Кеннет Форд

МИР элементарных частиц.



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»

Kenneth W. Ford

THE WORLD OF ELEMENTARY PARTICLES

BLAISDELL PUBLISHING COMPANY
New York • Toronto • London
1963

Кеннет Форд

МИР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Перевод с английского
Е. М. Лейкина

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
Москва
1965

УДК 539.1

Книга Кеинета Форда — это увлекательный рассказ о том, что происходит на передовой линии фронта современной физики, на том участке науки, где проннкают в загадочный мир так иазываемых элементарных частиц, самых малых кирпичиков материи. Помимо основных фактов, идей, опытов, автор говорит о весьма тонких вещах — о связи принципов симметрии с законами сохранения, о волновых полях и природе частиц, о фейнмановских диаграммах. Все эти сложные вопросы, которые на первый взгляд недоступны для популяризацин, удивительно ясно изложены в этой иебольшой книге. Книга позволит читателю глубже понять устройство микромира и царящие в нем закономерности.

Круг читателей книги Форда весьма широк — от любознательных школьников старших классов до ученых нефизиков, желающих познакомиться с тем, что делают сейчас физики, штурмующие вершины неизвестиого.

Редакция литературы по физике

ОТ АВТОРА

Это книга не о методах физики, а о ее представлениях. Это попытка изложить современный научный взгляд на мир, сформировавшийся под влиянием открытий в микромире, произошедших в физике XX века. В книге упоминаются некоторые ключевые эксперименты, однако в основном умышленно опущено описание исключительно сложных методов, используемых в настоящее время для изучения микромира. Это сделано для того, чтобы сконцентрировать все внимание на характере теорий и идей, представляющих современный уровень знания на передовых рубежах физической науки. Чтобы отдать должное сложным и удивительным приборам, которые применяются для получения от природы информации о мире элементарных частиц, потребовалась бы отдельная книга, и такую книгу следовало бы написать!

Тех, кто будет читать эту книгу, я прошу иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, физика — наука экспериментальная. Каждая теория, каждая концепция и каждое представление о природе в конечном счете основаны на экспериментальных данных, на том, что *действительно происходит* в природе. Отвлеченные, умственные построения имеют целью лишь дать простое и последовательное описание экспериментальных данных.

Во-вторых, следует иметь в виду, что любое «объяснение» экспериментальных фактов всегда носит временный характер. Преуспевающие теории редко впоследствии оказываются ошибочными, скорей

обнаруживается, что они имеют ограниченную область применения и уступают место общим теориям. Поэтому может статься, что некоторые утверждения, встречающиеся в этой книге, позже окажутся неверными. Да и *представление* о строении мира, мысленная картина той активности, господствующей в глубинах природы, к которой нас привела современная теория, может подвергнуться очередному пересмотру новой теорией. Не будет удивительно, если мы станем свидетелями этого в ближайшие десятилетия. Эта книга излагает состояние дел, а не утверждает конечных истин.

Созданию этой книги способствовали многие мои учителя и коллеги. В особенности я благодарен Дж. А. Уилеру, под руководством которого я впервые почувствовал себя как дома в мире элементарных частиц, а также Б. Стирнсу и Б. Фельду, которые тщательно познакомились с рукописью и сделали множество полезных замечаний.

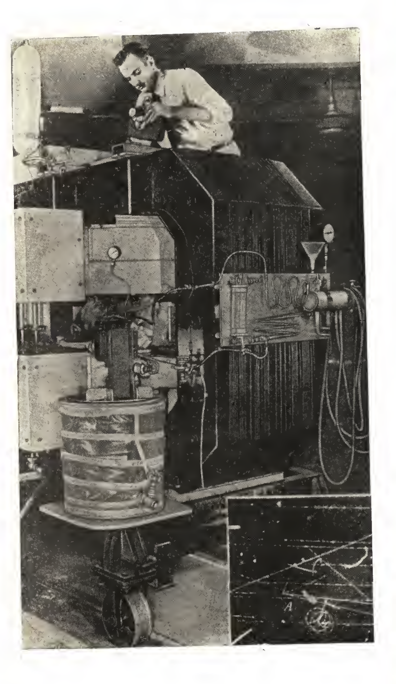
Помещенные в книге фотографии были мне любезно предоставлены рядом институтов и лабораторий: Брукхэйвенской национальной лабораторией, Массачусетским технологическим институтом, Калифорнийским технологическим институтом, лабораторией излучений Калифорнийского университета, Оптическим институтом в Париже, Колумбийским университетом, а также заимствованы из статей, опубликованных в журналах «Physical Review» и «Physical Review Letters».

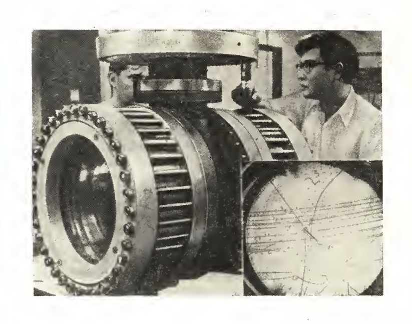
ГЛАВА
ПЕРВАЯ

Зоопарк элементарных частиц

Если высоко в небе пролетает реактивный самолет, то мы ясно видим тянущийся за ним след — облако кристалликов льда, хотя сам самолет не всегда можно разглядеть. Человечеству очень повезло в том смысле, что мельчайшие предметы, о которых оно что-либо знает, сгустки вещества и энергии, называемые элементарными частицами, ведут себя таким же точно образом. Отдельная элементарная частица в десятки миллиардов раз меньше предмета, который можно разглядеть в микроскоп. И тем не менее, пролетая с огромной скоростью через камеру Вильсона или более современный прибор — пузырьковую камеру, такая частица оставляет след, видимый невооруженным глазом. Такой след можно сфотографировать, а затем подробно изучить (фиг. 1). Частица может оставить свой след в специально приготовленной фотографической эмульсии; ее присутствие может быть также зарегистрировано благодаря срабатыванию радиотехнического устройства.

На долю современного физика выпадает чрезвычайно сложная задача —





ФИГ. 1. *Детекторы частиц.*

На *левой* фотографии — 16-дюймовая камера Вильсона, помещенная между полюсами мощного электромагнита (Брукхэйвенская национальная лаборатория); на *верхней* фотографии — 15-дюймовая пузырьковая камера Кембриджской группы.

На *вставках* — следы, оставленные в этих камерах быстрыми частицами. На левой — один из многочисленных протонов, пролетающих через камеру, испытал в точке *A* соударение с атомным ядром, в результате которого образовались две новые частицы (π-мезоны). На верхней фотографии большинство следов оставлено пучком π-мезонов; на стр. 233 эта фотография будет объяснена.

Пролетая с большой скоростью через вещество, электрически заряженная частица (протон или π-мезон) один за другим разрушает на своем пути атомы и оставляет след из электрически заряженных атомов, носящих название *ионов*. В заполненной газом камере Вильсона эти ионы играют роль центров конденсации содержащихся в газе паров. Путь частицы через газ отмечается цепочкой жидких капелек (обычные облака также представляют собой осевшие на ионах капельки). В заполненной жидкостью пузырьковой камере след частицы отмечается линией из пузырьков газа. Ионы, оставляемые частицей, играют роль центров кипения перегретой жидкости в камере. Фотографирование производится мгновенно спустя после образования пузырьков, прежде чем кипение, начавшееся вдоль следа, успеет распространиться на весь объем жидкости.

воссоздать по этим следам и по щелчкам счетчиков образ элементарной частицы. Грубо говоря, это похоже на попытку определить по заоблачным следам конструкцию пролетевшего реактивного самолета. Но именно старания разгадать тайны элементарных частиц заставляют физиков сооружать гигантские ускорители, проводить хитроумные, сложные опыты, в которых используются все новейшие достижения техники, вести согласованное наступление по фронту теории и математики.

За последние годы удалось довольно много узнать об элементарных частицах, во всяком случае достаточно, чтобы классифицировать различные виды частиц, познакомиться с внутренними свойствами каждой из них и изучить взаимодействия частиц одного сорта с частицами другого сорта, т. е. получить первые представления об устройстве природы на субмикроскопическом уровне. И все же успехи наши на этом пути еще весьма скромны. В настоящее время не существует общей теории элементарных частиц, которая могла бы ответить на ряд вопросов, например: почему существует определенное количество частиц (и есть веские основания считать, что они пока еще не все открыты), почему частицы обладают именно теми массами, которыми они обладают, почему частицы рождаются, живут и погибают так, как это происходит в действительности (большинство частиц живет не более миллионной доли секунды)?

Но элементарные частицы — отнюдь не любопытные научные парадоксы. Они олицетворяют ту ступень в познании строения вещества, до которой удалось добраться человеку, и изучение их выдвигает весьма заманчивые проблемы, лежащие на передовых рубежах науки. На протяжении всей истории самым мощным стимулом научного прогресса являлась вера в то, что законы природы просты в своей основе, и теперь эта вера побуждает ученых искать пути построения теории элементарных частиц. Большинство ученых полагают, и в этом смысле история на их стороне, что в один прекрасный день весь набор различных частиц, обладающих самыми разнообразными свойствами, предстанет перед нами в виде простой и строгой схемы, ко-

торая откроет путь к еще более сокровенным тайникам природы.

В этой книге в основном рассказано о том, что́ сейчас известно об элементарных частицах и что можно узнать о строении вещества, изучая элементарные частицы. (Мы иногда будем опускать эпитет «элементарные», в нем, по-видимому, нет большой необходимости.) Мы расскажем здесь также, почему мы считаем, что еще многое надо узнать, и укажем то место, которое занимает физика элементарных частиц в современной физической науке. Исследование элементарных частиц вызвало в научном мире большой энтузиазм; быть может, и этой книге удастся донести до читателей хоть небольшую часть этого энтузиазма. Развитие науки, по существу, связано с тем, что границы, обусловленные непосредственным чувственным восприятием окружающего нас мира (так называемого макромира), раздвинулись как в масштабы космоса, так и в глубины микромира. Элементарные частицы характеризуют тот предел, которого мы достигли сейчас на пути в глубь вещества. Представление о том, что мир сложен из элементов, которые в свою очередь состоят из еще более мелких элементов и т. д. (представление довольно плодотворное), заставляет рассматривать исследование мира элементарных частиц как главное направление современной науки.

Человек и предметы окружающего его мира построены из атомов и молекул. На рубеже нашего столетия уже было известно о существовании атомов, однако, как и в современной физике элементарных частиц, строение атомов и их взаимосвязь казались загадочными. Было известно, что атом представляет собой мельчайшую частицу данного элемента, например водорода, кислорода, натрия или урана, что существует свыше 80 различных сортов атомов (сегодня их уже известно более сотни) и что все атомы имеют примерно одинаковые размеры. Но размеры эти таковы, что уложенные в ряд сто миллионов атомов могут разместиться на отрезке длиной не более дюйма. Кроме этого, было известно, что группы атомов различных сортов могут объединяться и образовывать крошечные системы, называемые *молекулами*. Молекулы же образуют основной строительный материал

для огромного и удивительно разнообразного набора веществ окружающего нас мира. Простейшие молекулы содержат совсем немного атомов. Молекула столовой соли, хлористого натрия, состоит только из двух атомов: одного атома натрия и одного атома хлора. Хорошо всем известная молекула воды, H_2O, построена из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Более сложные молекулы, например молекулы белка живой ткани, содержат многие тысячи атомов.

Первое десятилетие XX века ознаменовалось обильным потоком открытий, быстро следовавших одно за другим; они привели к гигантскому прорыву в субатомный мир элементарных частиц. Первая известная нам частица — электрон — была открыта в 1897 г.; предполагалось, что эта частица содержится внутри атомов. Электроны — это общая составная часть разных атомов, представляет собой в то же время и связующее звено между различными атомами. Еще одно важное звено вырисовалось в 1902 г., когда было обнаружено, что радиоактивные атомы (самопроизвольно испускающие излучение) могут превращаться в атомы совершенно другого сорта. Это обстоятельство убедительно доказывало, что атомы — это отнюдь не независимые, неделимые единицы, а образования, построенные из общего более простого строительного материала.

Вскоре после этого выбрасываемые с большой скоростью радиоактивными атомами альфа-частицы начали использоваться в качестве первых снарядов для бомбардировки атомов. (Эти атомные «снаряды», щедро создаваемые самой природой, не обладают достаточной для современных задач энергией. В наши дни их заменили частицы, искусственно разогнанные до еще больших скоростей в гигантских ускорителях.) В результате первых бомбардировок было установлено, что внутреннюю часть атомов в значительной степени занимает пустое пространство. В 1911 г. экспериментатор Эрнест Резерфорд обнаружил в атоме массивную сердцевину, несущую положительный электрический заряд — ядро, которое по своим размерам было по крайней мере в десять тысяч раз меньше всего атома, а оставшееся пространство оказалось

занятым несколькими легкими электронами, несущими отрицательный электрический заряд. Двумя годами позже теоретику Нильсу Бору удалось создать математическое описание движения электронов в атоме. Не считая некоторых незначительных уточнений, это описание в основном сохранилось до наших дней и дает картину строения атома. Электроны быстро вертятся вокруг ядра, создавая как бы оболочку атома, подобно тому, как вращающийся пропеллер приобретает форму диска. Подобно пуле, которая свободно пролетала между лопастями пропеллера истребителя времен первой мировой войны, быстрая частица может легко проникать сквозь электронное облако в глубь атома. Однако посторонний атом, приблизившийся сравнительно медленно, вынужден будет на периферии облака повернуть назад, подобно тому как отскочит обратно камень, брошенный во вращающийся пропеллер.

Ядро легчайшего атома, водорода, назвали протоном, и вместе с электроном эти две частицы пятьдесят лет назад исчерпывали весь список известных элементарных частиц. Считалось, что более тяжелые ядра состоят из нескольких плотно упакованных протонов и электронов. Детали того, как собственно выглядит структура ядра, никогда не были до конца ясны; в 1932 г. от этого представления отказались. Однако оно содержало чрезвычайно заманчивую идею — свести все к двум основным частицам — отрицательно заряженному электрону и положительно заряженному протону, из которых построено все вещество во Вселенной. Единственной загадочной особенностью (эта загадка еще не решена и сейчас) было то, что протон оказался гораздо тяжелее электрона. Во всяком случае идиллия с двумя элементарными частицами не могла долго продолжаться.

В начале тридцатых годов произошло несколько событий, которые положили начало непрерывным открытиям новых элементарных частиц, и этот поток открытий продолжается и в наши дни. Была обнаружена новая частица — нейтрон; ее масса примерно такая же, как у протона, но она лишена электрического заряда. Нейтрону был оказан весьма радушный прием, потому что именно эта частица, соединяясь с

протоном, образовывала атомное ядро. Картина строения ядра, немедленно получившая всеобщее признание и сохранившая свое значение и по сей день, состояла в том, что ядро стали рассматривать как совокупность протонов и нейтронов, скрепленных между собой большими новыми силами, называемыми просто *ядерными силами*. Так, ядро U^{235} (наиболее популярного изотопа урана) содержит 92 протона и 143 нейтрона. Более простое ядро гелия (называемое также *альфа-частицей*) содержит два нейтрона и два протона.

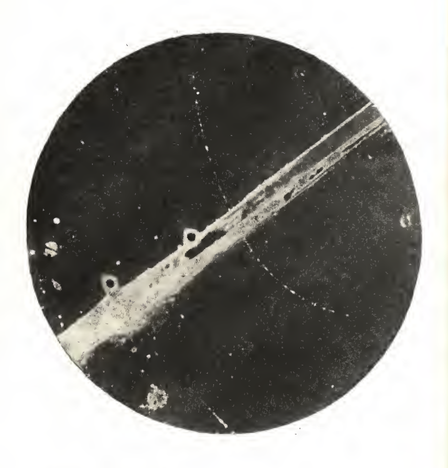
Почти в то же самое время в Пасадене (штат Калифорния) по следу, оставленному в камере Вильсона, экспонированной в космических лучах, была открыта четвертая частица. Эта новая частица, позитрон, оказалась столь же легкой, как и электрон, но она несла на себе не отрицательный, а положительный электрический заряд. На фиг. 2 показаны следы, оставляемые позитронами. Подобно нейтрону, позитрон появился весьма вовремя. Несколько раньше, в 1928 г., Поль Дирак создал новую теорию электрона, которая великолепно объясняла даже мелкие детали строения атомов. Однако теория Дирака, казалось, имела один порок. Она предсказывала, что электрон имеет близнеца-частицу, сходную с ним во всех отношениях, за исключением знака электрического заряда. В здании теоретической физики уже было заготовлено место, ожидавшее эту частицу — позитрон, когда в 1932 г. Карл Андерсон открыл ее. (Теория Дирака предсказывала также существование отрицательного близнеца протона, названного антипротоном, но прошло много лет, прежде чем эту частицу удалось обнаружить. Создание антипротонов впервые стало возможным после постройки в Беркли, штат Калифорния, шестимиллиардного ускорителя — Беватрона; эти частицы впервые наблюдались в 1955 г.)

Развитие физических представлений в начале тридцатых годов привело к повторному открытию старой частицы — фотона. Гораздо раньше, в 1905 г., т. е. в тот же год, когда Эйнштейн опубликовал свою первую фундаментальную работу по теории относительности, он показал, что явление, носящее название фотоэлектрического эффекта (об этом рассказано в

главе пятой), лучше всего можно объяснить, допустив, что световые волны поглощаются только порциями определенных размеров. Эти порции энергии, называемые теперь фотонами, хотя и вели себя как частицы, все же совсем не были похожи на обычные частицы вещества. Они не обладали массой, хотя и несли с собой энергию, их движение нельзя было ни ускорить, ни замедлить, и двигались они всегда с одной и той же огромной скоростью. Фотоны могли возникать и исчезать (т. е. испускаться и поглощаться), тогда как обычные частицы (так полагали в то время) существовали постоянно. И в противоположность частицам вещества фотон никогда нельзя было застать в определенной точке пространства, исключая моменты его рождения или гибели; в остальное время он был «размазан» по пространству. По этим причинам фотон не считали истинной частицей, как электрон и протон.

Эти представления о фотоне изменились, когда в 1925 г. была создана квантовая теория, которая получила свое развитие в последующем десятилетии. Оказалось, что с принципиальной точки зрения разница между фотоном и частицами вещества не столь уж велика. Просто частицам повезло — они имеют массу, а фотон ее не имеет. А все остальные различия можно рассматривать как следствия этого единственного различия. В частности, квантовая теория подразумевает, что частицы вещества могут рождаться и аннигилировать. После этого индивидуальность фотона померкла, и его включили в список элементарных частиц.

Спустя некоторое время Энрико Ферми создал теорию, которая показала, что действительно люди на протяжении ряда лет являются свидетелями рождения частиц. Уже на первых этапах исследования радиоактивности в начале нашего столетия было установлено, что некоторые радиоактивные атомы выбрасывают быстрые электроны, которые в этом случае стали называть *бета-частицами*. Возникновение этих электронов вызывалось радиоактивным превращением, известным под названием *бета-распад*, но о его поистине революционном значении многие годы не подозревали. Поскольку было известно, что



ФИГ. 2. *Следы позитронов.*

Вверху — фотография, полученная Карлом Андерсоиом, на которой в 1932 г. был впервые обиаружен позитрои. Позитрон входит в камеру сверху и заворачивается в ией магиитным полем. Замедлившись в центральиой металлической пластнике, ои отклоияется сильиее. Электрон отклонился бы в противоположиую сторону.
Справа приведена сделаииая в камере Вильсона более поздияя фотография «ливия», который содержит миожество электронов, позитроиов и фотоиов. Несущий большую эиергию фотои может образовать электрон и позитрон, которые в свою очередь испускают фотоны, создающие дальиейшие пары электрои — позитрон и т. д., подобио фейерверку, пока энергия окоичательио ие израсходуется в ливне. На снимке справа частицы движутся по прямолииейиым траекториям, так как в этом случае магнитное поле отсутствовало.


2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

электроны входят в состав атомов, то не вызывало удивления то обстоятельство, что иногда электроны испускались атомами. Даже после обнаружения в 1911 г. атомного ядра, когда стало ясно, что бета-электроны должны испускаться ядром, значение бета-распада все еще не получило должной оценки. Предполагалось, что электроны просто существуют внутри ядра, точно так же, как и в окружающем ядро пространстве. Однако, после того как в 1932 г. открыли нейтрон и в связи с различными трудностями теории электроны наконец были изгнаны из ядра, теория бета-распада оказалась в тупике. В 1934 г. Ферми выдвинул предположение, что в момент радиоактивного превращения электрон внезапно возникает в ядре и под видом бета-частицы покидает ядро. Короче говоря, оказалось, что бета-распад, о котором было известно уже много лет, связан с рождением частиц вещества. Предположение Ферми, естественно, не было просто высказыванием. Сформулированное на языке математики в рамках квантовой теории, оно удовлетворительно объясняло явление бета-распада. Теория Ферми предсказала также возможность бета-превращений некоторых атомов, сопровождающихся испусканием не электронов, а позитронов, что впоследствии подтвердилось при искусственном создании радиоактивных материалов. Эта теория, лишь немного видоизмененная, продолжает правильно описывать все явления бета-распада и по сей день.

В физике часто случается, что успешные теории преподносят неожиданный сюрприз. Теории не только дают то, чего от них ожидали, но и несколько больше. Дираковская теория электрона прекрасно объяснила детали строения атома, а затем неожиданно для всех предсказала также существование позитрона. Аналогичным образом, теория Ферми объяснила бета-распад, а в качестве сюрприза предсказала существование новой необычной частицы — нейтрино. (Впервые нейтрино в действительности предсказал Вольфганг Паули за несколько лет до Ферми. Более точно, Ферми сформулировал математический аппарат для описания умозрительных гипотез Паули.) Согласно теории Ферми, в момент бета-распада образуется и одновременно с электроном вылетает из ядра частица,

не имеющая электрического заряда и с очень малой или равной нулю массой. (Сейчас считают, что эта частица, подобно фотону, не имеет массы.) Эти самые неуловимые из всех частиц не оставляют следа в камере Вильсона и проходят через километровые толщи вещества так, как будто на их пути ничего нет. Тем не менее по требованию теории эта частица была включена в семейство элементарных частиц, и если бы нейтрино в конце концов не было обнаружено, то это надолго вывело бы физиков из состояния душевного равновесия. История обнаружения нейтрино в 1956 г. и открытия второго типа нейтрино в 1962 г. будет изложена в главе пятой.

В середине тридцатых годов к электрону и протону присоединились фотон, нейтрон и позитрон (или антиэлектрон). Нейтрино, хотя оно и не наблюдалось на опыте, было необходимо из теоретических соображений. Поэтому его довольно спокойно присоединили к списку элементарных частиц. К тому же появились веские аргументы в пользу существования антипротонов и антинейтронов.

Еще до того как большинство ученых по всему миру отложили свои основные работы и отдали свой талант разработкам, связанным с военными требованиями, было предсказано существование еще двух частиц, а одна частица, о которой вообще никогда ранее ничего не говорилось, была обнаружена. В 1935 г. в Японии появилась блестящая теоретическая работа Хидеки Юкавы, в которой предсказывалось существование частицы, известной сейчас как π-мезон, или пион. После того как оправдались предсказания Юкавы, он был удостоен за эту работу Нобелевской премии. Юкава впервые изложил аргументы, относящиеся к природе сил, которые сыграли решающую роль в переходе от наших «повседневных» представлений о мире к новым представлениям о природе микромира.

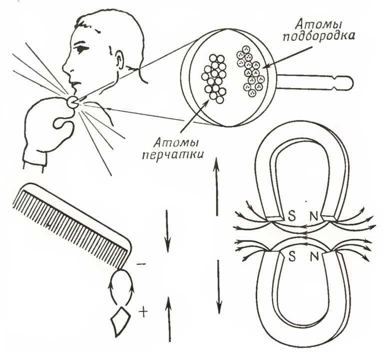
Понятие силы относится к числу обычных представлений нашей повседневной жизни. Сила — это натяжение или давление, обычно связываемое с непосредственным контактом. Сидение стула оказывает силу, удерживающую вас от падения. Если вы столкнетесь на тротуаре с прохожим, то ощутите силу, отбрасы-

вающую вас в сторону. Между колесом автомашины и дорогой действует сила, толкающая машину вперед, и если контакт между шинами и мостовой нарушается (как это бывает во время гололеда), то не может возникнуть и достаточной силы. Но, кроме того, нам известны силы, воздействие которых не связано с непосредственным контактом. В сухую погоду расческа после контакта с волосами приобретает способность на расстоянии притягивать кусочки бумаги. Два магнита, поднесенные близко один к другому, могут притягиваться и отталкиваться, даже не находясь в непосредственном контакте. Более того, представление о контакте — касании — в атомных масштабах теряет смысл. При столкновении двух пешеходов атомы рукава одежды одного соударяются с атомами рукава одежды другого. Но атомы не имеют четко выраженной границы — это объекты с размытой поверхностью. Поэтому нельзя сказать, касается один атом другого или нет. Можно лишь утверждать, что два атома, находящиеся вблизи друг от друга, оказывают взаимное воздействие, а при удалении воздействуют слабо или вообще не оказывают воздействия.

В середине XIX века ученые отказались от наивного представления о силе, действующей при непосредственном соприкосновении, и на смену ему пришла идея о «действии на расстоянии» (фиг. 3). Так, сила тяготения переносит свое воздействие через обширные просторы пустого пространства. Для возникновения электрической силы, с которой расческа действует на кусочек бумаги, и магнитной силы, действующей между двумя магнитами, нет необходимости в непосредственном контакте. Даже обычные силы соприкосновения, например силу воздействия перчатки боксера на подбородок его противника, можно интерпретировать как действующую на расстоянии (правда, неприятно близком) силу между различными группами атомов. Для объяснения того, *почему* силы могут действовать через пустое пространство, было введено понятие новой физической реальности — «поля». Мы отложим обсуждение полей до главы седьмой.

Через несколько лет после создания квантовой механики и совсем незадолго до работы Юкавы была

развита квантовая теория электрических и магнитных сил. Эта теория вызвала к жизни новый подход к фотону, и он был причислен к элементарным частицам; теория приписала ему роль переносчика силы. Например, протон и электрон (оказывающие друг на друга



ФИГ. 3. *Природа сил.*

Кажущийся контакт между перчаткой боксера и подбородком противника на самом деле — «действие на расстоянии». Различные группы атомов воздействуют друг на друга через промежуточное пространство, подобно тому как в отсутствие контакта наэлектризованный гребень притягивает клочок бумаги или два магнита отталкивают друг друга. Все три изображенные здесь силы — электрические по своей природе и возникают в результате быстрого обмена фотонами.

электрическое притяжение) непрерывно обмениваются фотонами. Каждая частица, несущая электрический заряд, непрерывно испускает и поглощает фотоны, и именно благодаря этому непрестанному обмену возникает сила. Но каким образом в действительности обмен приводит к возникновению силы, строго говоря,

трудно изобразить наглядными средствами. Здесь может помочь лишь грубая аналогия. Отдельная заряженная частица испускает, а затем вновь поглощает фотоны совсем так, как ребенок бросает мяч, привязанный к резиновому шнурку, который и возвращает ему мяч обратно. Если рядом окажется другой ребенок, играющий таким же мячом, то каждый из ребят сможет «поглощать» мяч своего соседа, т. е. ловить чужой мяч, когда он окажется над ним. Тогда резиновый шнурок будет стремиться стянуть вместе обоих играющих, т. е. обмен приведет к возникновению силы притяжения. Такова примерно наглядная и по возможности близкая аналогия процесса обмена фотонами, но она не вполне точна. Фактически ведь фотоны ни с чем не связаны (резинового шнурка нет), и обмен фотонами может привести к возникновению как сил притяжения, так и сил отталкивания. Так или иначе, квантовая теория обмена фотонами создала совершенно новое представление о природе электрических и очень тесно связанных с ними магнитных сил.

Юкава размышлял над проблемой мощных ядерных сил, действующих между ядерными частицами — протонами и нейтронами — и удерживающими эти частицы в крошечном атомном ядре. У него возник вопрос: а что если эти силы также обусловлены обменом, происходящим между ядерными частицами? Он показал, что частицей, служащей разменной монетой, не может быть ни фотон, ни любая другая из известных частиц. (Рассуждения Юкавы, покоящиеся на основных представлениях квантовой теории, будут приведены в главе шестой.) Новая частица должна была быть в 200—300 раз массивнее электрона (но в 6—8 раз легче протона). Прошло более десятка лет, прежде чем частица Юкавы наконец была обнаружена, сначала в 1947 г. в космических лучах, а на следующий год — среди продуктов ядерных превращений на ускорителе в Беркли. Эта частица, нареченная π-мезоном (пионом), в наши дни представляет собой прекрасно изученный экспонат зоопарка элементарных частиц. Она в 274 раза массивнее электрона, и почти нет сомнений в том, что она представляет собой ту промежуточную частицу, которая главным образом и ответственна за наличие ядерных сил.

Идея Юкавы о том, что все силы возникают в результате обмена промежуточными частицами, привела к предсказанию еще одной новой частицы — гравитона. Сила тяготения, обеспечивающая устойчивость Солнечной системы, принадлежит, совершенно очевидно, к дальнодействующим силам. Подобно электрической силе, она имеет безграничный радиус действия. Следовательно, и частицы, обмен которыми обеспечивает гравитационную силу, подобно фотонам, не должны иметь массы. Эти пока не обнаруженные частицы окрестили гравитонами, и мы знакомы со свойствами гравитонов, хотя еще никогда не наблюдали этих частиц. Возможность прямого обнаружения гравитонов в ближайшем будущем весьма сомнительна вследствие слабости гравитационного взаимодействия. Сила тяготения значительно слабее других сил, известных людям. Это утверждение может показаться странным. Каждый, кто занимался альпинизмом и брал высоты в 4000 метров, или, катаясь на лыжах, ломал ногу, вполне обоснованно мог бы утверждать, что сила тяжести — самый сильный противник, с которым ему пришлось бороться. Решение этого парадокса, который состоит в том, что эта сила (с ней мы прекрасно знакомы в жизни) — самая слабая в природе, мы отложим до главы пятой.

Довольно скоро после того, как были предсказаны π-мезон и гравитон, открыли и μ-мезон, или мюон. Это событие положило начало периоду хаоса в физике элементарных частиц, длящемуся и до настоящего времени. За этот период на сцене появлялись одна за другой частицы, о существовании которых прежде и не подозревали. Впервые след μ-мезона был однозначно идентифицирован в 1936 г. на фотографиях космических лучей в камере Вильсона. Свойства этой частицы на протяжении следующего десятилетия постепенно оказались в центре внимания физиков. На первый взгляд μ-мезон казался той частицей, которую предсказал Юкава, так как его масса в 200 раз превосходила массу электрона. Однако со временем стало ясно, что μ-мезон не может играть той роли, которую ему предназначал Юкава. Ведь эта гипотетическая частица Юкавы должна быть ответственна за существование ядерных сил и, следовательно, сильно

взаимодействовать с ядрами. А μ-мезон вел себя безразлично к ядрам и реагировал лишь на электрические заряды протонов, в остальном же проходил сквозь ядра так, как если бы их вообще не было. Сегодня свойства μ-мезонов известны во всех подробностях, однако место, которое им отвела природа, остается для нас загадкой.

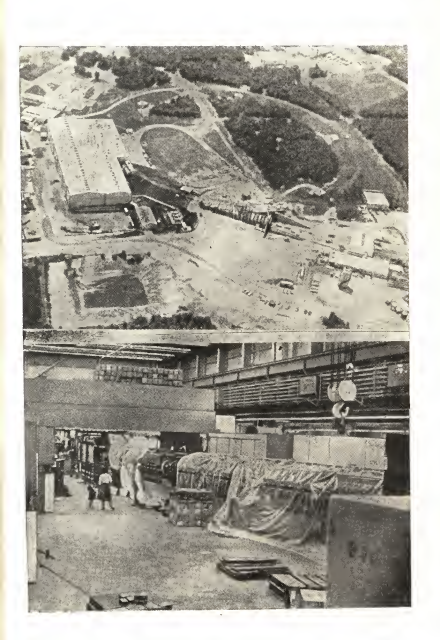
В период с 1947 по 1954 г. список известных элементарных частиц значительно пополнился благодаря открытию еще четырех типов частиц, известных под общим названием «странные частицы». (Этим названием физики во всеуслышание признали загадочность свойств новых и неожиданных частиц.) Самые легкие из странных частиц *K*-мезоны, или каоны (*K*-мезон примерно в два раза легче протона). Все остальные группы странных частиц Λ-, Σ- и Ξ-частицы несколько тяжелее протона. Все эти частицы впервые были обнаружены в космическом излучении. В настоящее время их свойства изучаются на гигантских ускорителях в Женеве (Швейцария), Брукхэйвене и Беркли (США) и Дубне (СССР). На фиг. 4 изображен Брукхэйвенский ускоритель.

До постройки этих ускорителей физикам приходилось пользоваться космическими лучами как единственным источником частиц. К счастью, Земля непрерывно бомбардируется частицами, приходящими из космического пространства, причем их количества достаточны, чтобы физики могли их изучать, но их не так уж много, чтобы создать угрозу для здоровья населения земного шара; оно находится под надежным прикрытием атмосферы. Большинство приходящих из космоса частиц — это протоны; часть их несет

▶

ФИГ. 4. *Брукхэйвенский синхротрон с переменным градиентом.*

Магнитное поле проводит протоны по окружности кольца (диаметром около 240 *м*), который находится в частично зарытом в землю туннеле, пока они набирают все большую и большую энергию. Менее чем за 1 *сек* протоны совершают свыше 300 000 оборотов, достигая максимальной энергии в 33 млрд. *эв*. Ежеминутно в машине ускоряется 7000 млрд. протонов, предназначенных для использования в качестве бомбардирующих снарядов в исследованиях по физике элементарных частиц. На *верхней* фотографии — вид с самолета, ускоритель виден лишь как возвышающийся над кольцом холм. На *нижней* фотографии — ряд магнитов в экспериментальном помещении, внутри которых находится камера с пучком протонов (на время ремонта магниты закрыты от пыли чехлами).



исключительно высокую энергию. В атмосфере протоны испытывают ядерные соударения, в результате которых возникает каскад различных частиц, включая короткоживущие μ- и π-мезоны, странные частицы, а также фотоны, электроны и позитроны.

Большинство известных частиц было открыто в камерах Вильсона, экспонированных в космических лучах. Физик-экспериментатор, проводящий исследования с хаотическим потоком космических лучей, чем-то похож на авиаконструктора, который для испытания крыла выбирает чистое поле, где, он надеется, возникнет сильный ветер. И подобно тому как авиаконструктор пришел к аэродинамической трубе, где создается контролируемый режим испытания, так и физик обратился к подчиняющимся его воле пучкам частиц, ускоренным в гигантских установках. И лишь для исследования процессов, происходящих при энергиях, значительно превосходящих достижимые на ускорителях, физик вынужден обращаться к космическому излучению.

Чтобы исследовать мельчайшие частицы вещества, приходится создавать ускорители, которые по своим размерам не уступают футбольному полю. Этот парадокс основан на двух замечательных открытиях нашего столетия: открытиях связи между массой и энергией и связи между волнами и частицами. Мы разъясним во второй и третьей главах смысл этих неуловимых связующих звеньев, столь кардинально изменивших представления людей о природе микромира.

Физик, занятый поисками новых частиц, во многом похож на охотника, который расставляет капканы в незнакомом лесу. Физики устанавливают свои камеры Вильсона и другие детекторы и с беспокойством ждут, что произойдет. В 1962 г. было предсказано и обнаружено существование второго типа нейтрино[1]. Это открытие продемонстрировало истинную ценность новых гигантских ускорителей. Нейтрино не могут возникать сами по себе, они рождаются только одновременно с другими частицами. Нейтрино Паули и

[1]) Второе нейтрино было теоретически предсказано гораздо раньше. Его существование было постулировано в работах Сакаты, Б. М. Понтекорво и других. — *Прим. перев.*

Ферми — это партнер электрона, а у μ-мезона есть свой партнер — нейтрино. Когда был введен в строй Брукхэйвенский ускоритель (см. фиг. 4), появилась возможность ответить на вопрос: действительно ли эти нейтрино различны? Ответ оказался утвердительным, и зоопарк элементарных частиц пополнился еще одним экспонатом.

Хотя условия работы на современном ускорителе и позволяют производить поиски тех или иных частиц, например нейтрино, они сохраняют еще значительную неопределенность. Возникали и неожиданные сюрпризы. Недавние опыты на новых ускорителях позволили обнаружить целое семейство сверхкороткоживущих частиц. Эти частицы рождаются и погибают так быстро, что не успевают пройти сколько-нибудь заметного расстояния и не оставляют прямых улик о своем пребывании. Большинство известных ранее частиц жило достаточно долго, чтобы пройти путь по крайней мере в несколько сантиметров (расстояние в масштабе микромира огромное) и оставить след в камере Вильсона или пузырьковой камере. Новые частицы можно зарегистрировать лишь косвенными путями. И тут возникает почти философский вопрос: когда частица становится частицей? Некоторые физики предпочитают называть эти эфемерные частицы «резонансами». Но как бы их ни называли, они принадлежат, по-видимому, к элементарным системам, очень близким к тем, которые мы обычно считаем частицами из-за их продолжительного существования. Тем не менее во избежание лишних осложнений мы будем, как правило, учитывать не все эти недавно открытые резонансы; изучение их в тот момент, когда пишется книга, только начинается. То немногое, что уже известно о них, мы изложим в главе шестой.

Теоретика, пытающегося найти простое объяснение строению элементарных частиц и их связи друг с другом, количество этих частиц приведет в смущение. Однако с таким количеством еще вполне можно справиться, оно все же меньше числа различных атомов, которое было известно в 1900 г. В табл. 1 перечислены наименования и установленные характеристики известных в настоящее время экспонатов зоопарка элементарных частиц. К этой таблице мы

ТАБЛИЦА 1

Известные элементарные частицы [1])

Наименование семейства	Наименование частицы	Символ	Масса, *Мэв*	Спин и четность	Электрический заряд	Античастица	Число различных частиц	Среднее время жизни, *сек*	Основные способы распада
—	Фотон	γ	0	1^-	0	Совпадает с частицей	1	∞	—
—	Гравитон	—	0	2	0	Совпадает с частицей	1	∞	—
Электронное	Электронное нейтрино	ν_e	0 (< 0,0002)	1/2	0	$\overline{\nu_e}$	2	∞	—
	Электрон	e^-	0,511006	1/2	Отрицат.	e^+ (позитрон)	2	∞	—
μ-мезонное	μ-мезонное нейтрино	ν_μ	0 (< 4)	1/2	0	$\overline{\nu_\mu}$	2	∞	—
	μ-мезон	μ^-	105,659	1/2	Отрицат.	μ^+	2	$2{,}20 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \to e^- + \overline{\nu_e} + \nu_\mu$
Мезонное	π-мезон	π^0	135,01	0^-	0	Совпадает с частицей	3	$1{,}80 \cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \to \gamma + \gamma$
		π^+	139,60	0^-	Положит.	π^-		$2{,}55 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \to \mu_+ + \nu_\mu$

K-мезон	K^+	493,8	0^-	Положит.	K^-		$1{,}23 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ (63%) $K^+ \to \pi^+ + \pi^0$ (21,5%) $K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ (5,5%) и другие
	K^0	498,0	0^-	0	$\overline{K^0}$	4	K_1 2) $0{,}92 \cdot 10^{-10}$ K_2 $5{,}62 \cdot 10^{-8}$	$K_1 \to \pi^+ + \pi^-$ (69,4)% $K_1 \to \pi^0 + \pi^0$ (30,6%) $K_2 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ (27,1%) $K_2 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (12,7%) $K_2 \to \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu$ (26,6%) $K_2 \to \pi^- + e^+ + \nu_e$ (33,6%)
η-мезон	η^0	548,7	0^-	0	Совпадает с частицей	1	$\sim 10^{-17}$ (теория)	$\eta^0 \to \gamma + \gamma$ (35,3%) $\eta^0 \to \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ или $\pi^0 + \gamma + \gamma$ (31,8%) $\eta^0 \to \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ (27,4%) $\eta^0 \to \pi^+ + \pi^- + \gamma$ (5,5%)

1) Таблица переработана в соответствии с новыми данными; в нее не включены частицы, испытывающие сильные распады, т. е. резонансы (см. табл. 4, стр. 236). — *Прим. перев.*

2) У K^0-мезона имеются две разновидности: долгоживущая K_2 и короткоживущая K_1.

Наименование семейства	Наименование частицы	Символ	Масса, *Мэв*	Спин и четность	Электрический заряд	Античастица	Число различных частиц	Среднее время жизни, *сек*	Основные способы распада
Барионное	Нуклон	p	938,256	$1/2^+$	Положит.	$\overline{p}$	4	∞	—
		n	939,550	$1/2^+$	0	$\overline{n}$		$1{,}01 \cdot 10^3$	$n \to p + e^- - \nu_e$
	Λ-частица	Λ^0	1115,40	$1/2^+$	0	$\overline{\Lambda^0}$	2	$2{,}62 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \to p + \pi^-$ (67,7%) $\Lambda^0 \to n + \pi^0$ (31,6%)
	Σ-частица	Σ^+	1189,41	$1/2^+$	Положит.	$\overline{\Sigma^+}$		$0{,}788 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^+ \to p + \pi^0$ (51%) $\Sigma^+ \to n + \pi^+$ (49%)
		Σ^0	1192,4	$1/2^+$	0	$\overline{\Sigma^0}$	6	$< 1 \cdot 10^{-14}$	$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$
		Σ^-	1197,08	$1/2^+$	Отрицат.	$\overline{\Sigma^-}$		$1{,}58 \cdot 10^{-10}$	$\Sigma^- \to n + \pi^-$
	Ξ-частица	Ξ^0	1314,3	$1/2^+$	0	$\overline{\Xi^0}$	4	$3{,}06 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \to \Lambda^0 + \pi^0$
		Ξ^-	1320,8	$1/2^+$	Отрицат.	$\overline{\Xi^-}$		$1{,}74 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-$
	Ω-частица	Ω^-	1675	$3/2^+$ (?)	Отрицат.	$\overline{\Omega^-}$	2	$0{,}7 \cdot 10^{-10}$	$\Omega^- \to \Xi^0 + \pi^-$ $\Omega^- \to \Xi^- + \pi^0$ $\Omega^- \to \Lambda^0 + K^-$

время от времени будем обращаться и в последующих главах. Оставшаяся часть этой главы будет посвящена главным образом обсуждению отличительных характеристик отдельных частиц.

Число различных типов частиц, вошедших в табл. 1 и существование которых можно считать твердо установленным, достигает 13, или если присоединить к ним гравитон (в наличии последнего нет особых сомнений), то 14. Некоторые частицы, состоящие в близком родстве, объединены друг с другом. Так, электрон и его античастица, позитрон, представляют собой частицы одного вида. Нейтрон и протон также объединены единым наименованием — нуклон, а их антиподы — антинейтрон и антипротон — именуются антинуклон (эти названия обязаны своим происхождением тому обстоятельству, что из нейтронов и протонов построены ядра — nuclei). Полное число различных элементарных частиц без учета гравитона достигает 35.

Пожалуй, наиболее важной характеристикой частицы служит величина ее массы. Фотон, гравитон и нейтрино обоих типов лишены массы. Отсутствие массы эквивалентно отсутствию инерции, т. е. сопротивления, которое тело оказывает ускорению. Следовательно, частицы, лишенные массы, всегда будут двигаться с максимально возможной в природе скоростью, т. е. с постоянной скоростью, равной скорости света. (Эта скорость может с одинаковым успехом называться также скоростью распространения гравитации, или скоростью нейтрино.) Легчайшей частицей, обладающей массой, являются электрон и равный ему по массе позитрон. Поэтому масса электрона служит удобной единицей измерения массы других частиц. Далее следует μ-мезон, который более чем в 200 раз тяжелее электрона; π-мезон несколько тяжелее μ-мезона, но массы их разнятся очень незначительно, и это объясняет, почему открытый раньше μ-мезон спутали с π-мезоном. Список продолжается до самой тяжелой из известных элементарных частиц, Ω^--частицы, масса которой в 3350 раз больше массы электрона. Имеются, конечно, и более тяжелые частицы, ядра, атомы, молекулы или соринки, попадающие в глаз. Но все они считаются построенными из нескольких частиц, приведенных в табл. 1. Самой тяжелой из эле-

ментарных частиц является Ω^--частица, которую еще нельзя считать построенной из каких-либо более легких частиц. Кроме того, не исключена возможность, что *все* эти частицы состоят из каких-то более простых элементов.

Созданная Дираком теория электрона первая предсказала, что в природе для каждой частицы должна существовать сходная с ней частица с той же самой массой, но с противоположным электрическим зарядом и некоторыми другими врожденными характеристиками. Эта родственная частица обычно называется античастицей (хотя сама по себе это вполне полноценная частица); в природе, по-видимому, у каждой частицы есть своя античастица. (Для античастицы античастицей является исходная частица.) В случае фотона, гравитона и нейтрального π- и η-мезонов античастицы в точности совпадают с самими частицами, тогда как у других экспонатов зоопарка частица и античастица различны. Например, антинейтрон отличается от нейтрона, хотя оба они нейтральны. Различие протона и антипротона еще нагляднее, так как один заряжен положительно, а другой отрицательно. Обычно античастицу обозначают тем же символом, что и частицу, но с горизонтальной чертой сверху.

Существование в природе пар частица — античастица явилось поразительным и неожиданным предсказанием теории, вызванной к жизни союзом теории относительности и квантовой механики. Едва ли можно рассказать на словах, как это произошло. Законы теории относительности носят всеобщий характер, т. е. им подчиняются все прочие теории. Конкретные теории, например квантовая механика, должны удовлетворять следующему условию: если экспериментатор проводит одни и те же измерения в различных системах отсчета, то он должен получать одинаковые результаты. Оказалось, что нельзя построить теорию без античастиц, которая удовлетворяла бы требованиям инвариантности, накладываемым теорией относительности. Законы теории относительности могут быть удовлетворены лишь при условии существования античастиц. Это можно сравнить с набором одинаковых полосок (фиг. 5), окрашенных с одной стороны в красный цвет, а с другой — в зе-



Фиг. 5. Цветные полоски.

Из них нельзя построить «инвариантной» картинки, на которой красные и зеленые части выглядели бы одинаково.



Фиг. 6. «Антиполоски».

Они необходимы для того, чтобы вместе с полосками, показанными на фиг. 5, образовать инвариантные по цвету фигуры, аналогично тому, как частицы и античастицы необходимы для построения инвариантной теории.

леный; из них надо построить любую фигуру, обладающую такой инвариантностью, чтобы фигура в целом казалась одинаковой как человеку, который видит только красные полосы, так и человеку, который видит только зеленые полосы. Вы очень скоро установите, что сделать это невозможно без «антиполосок», типа изображенных на фиг. 6. Аналогично, одних частиц оказывается недостаточно для построения релятивистской теории. Для этого необходимы и античастицы. Таким образом, имеется достаточно аргументов в пользу античастиц, и их существование подтверждает положения как теории относительности, так и квантовой механики. На фиг. 7 приведена любопытная фотография, на которой изображены анти-Λ и два антипротона.

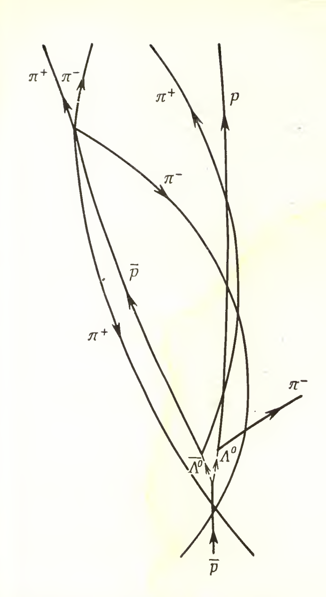
Удивительной особенностью большинства частиц является наличие у них спина. Это означает, что каждая частица наподобие волчка вращается вокруг некоторой оси с неизменной скоростью, характерной для частицы. В действительности нельзя сказать, с какой скоростью вращается частица. Величину ее спина нельзя выразить в числе оборотов за минуту. Спин измеряется в единицах момента количества движения. Момент количества движения — несколько более сложное понятие, и величина его зависит не только от скорости вращения, но и от массы и размера вращающегося объекта. Мы не будем давать точного определения, а лишь отметим, что чем больше скорость, масса, размер или любая комбинация этих величин, тем больше момент количества движения. У вращающегося электрона имеется определенный момент количества движения. Момент волчка гораздо больше, так как сам волчок много больше и тяжелее электрона, а у карусели момент количества движения еще больше, хотя она вращается с малой скоростью. Момент количества движения характеризует интенсивность вращения. Его величина связана с усилием, которое необходимо для того, чтобы вызвать или прекратить вращательное движение.

В микромире спин частиц обычно измеряют в единицах спина фотона, который полагается равным единице. Спин электрона равен $^1/_2$, т. е. половине момента количества движения фотона. Некоторые частицы,



ФИГ. 7. *Частицы и античастицы.*

Попадающий в пузырьковую камеру антнпротон нсчезает
При этом пронзошло редкое событне — рождение пары $\Lambda - \bar{\Lambda}$.
заряженные частнцы, обнаруживают себя. Одним из продук
гилирует в верхней части камеры, создавая целый поток л-
протоном. Камера помещена в магнитном поле, в результате
рону, а отрицательно заря



в нижней части фотографии в результате столкновения с протоном.
Эти нейтральные частицы не оставляют следа, но, распадаясь на
тов распада $\overline{\Lambda}$-частицы является новый антипротон, который анни-
мезонов. Это довольно обычный исход столкновения протона с анти-
чего положительно заряженные частицы отклоняются в одну сто-
женные — в другую.

например π-мезоны, вообще не имеют спина. За исключением гравитона, для которого предсказан спин, равный 2, все остальные частицы, кроме Ω^-, имеют спин, равный 0, $^1/_2$ или 1.

Согласно квантовой теории, некоторые физические величины могут принимать лишь вполне определенные, выделенные значения (на языке математики — «дискретные»). Именно к числу таких величин принадлежит момент количества движения. Если бы применить эти представления, скажем, к понятию скорости в окружающем нас мире, то автомашина могла бы двигаться только со скоростью 10, 20 или 30 *км/час* и не могла бы иметь никакой промежуточной скорости. При этих условиях все путешествие происходило бы рывками. И действительно, квантовая теория придает микромиру такой скачкообразный характер. Физическая система остается некоторое время в одном состоянии движения, а затем внезапно переходит в другое состояние. Однако спины элементарных частиц могут принимать только определенные разрешенные значения, сохраняя все время то или иное значение (пока существует частица).

Некоторые частицы обладают электрическим зарядом, а другие частицы нейтральны. Подобно спину, заряд — это величина, которая проявляется в природе только в упаковке определенного размера. В природе не бывает половины заряда электрона или же $3^1/_3$ электронного заряда. Величина электрического заряда электрона служит единицей электричества. Действительно, все прочие элементарные частицы либо нейтральны, либо имеют тот же по величине электрический заряд, что и электрон (либо положительный, либо отрицательный). Причина этого неизвестна. Ни один из известных законов не окажется нарушенным, если частица будет иметь точно удвоенный или утроенный заряд электрона. Но фактически одна частица не имеет заряда, большего, чем у электрона [1]).

[1]) Заряды, кратные заряду электрона, наблюдаются у резонансов, например в системе протон + π^+-мезон. В настоящее время, кроме того, выдвинута гипотеза о существовании частиц с дробным (!) электрическим зарядом. Подробнее об этом см. в Послесловии (стр. 308). — *Прим. перев.*

Некоторые частицы могут существовать в различных «зарядовых состояниях». У электрона единственное зарядовое состояние — отрицательное. Нейтральная Λ-частица также имеет только одно зарядовое состояние. Каждая из них имеет античастицу, положительно заряженный позитрон и нейтральную антилямбду соответственно. Наиболее многоликая из всех частиц, Σ-частица, существует в трех зарядовых состояниях — положительном, отрицательном и нейтральном, причем каждому из них соответствует антисигма-частица, так что всего имеется шесть различных Σ-частиц. Особый случай составляют π-мезоны. Античастицей положительного π-мезона является не самостоятельная античастица, а отрицательный π-мезон.

В общих чертах утверждение, что частица существует в различных зарядовых состояниях, означает следующее: частицы, имеющие разные заряды, в остальном столь близки друг к другу, что вполне логично рассматривать их как некие различные проявления «одной и той же» частицы. Например, нейтрон и протон — строительный материал атомных ядер — существенно различаются своими электрическими и магнитными свойствами, но имеют почти одинаковую массу и, по-видимому, испытывают одинаковое воздействие ядерных сил. Поэтому их рассматривают как различные зарядовые состояния одной и той же исходной частицы — нуклона. Это, грубо говоря, аналогично производству одинаковых автомобильных шасси и двигателей для выпуска двух разных моделей.

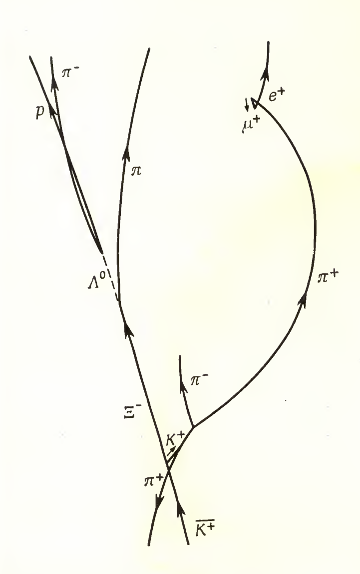
Масса частицы, ее заряд и спин принадлежат к числу наиболее важных характеристик частицы, но ни в коей мере не исчерпывают всех свойств, которыми она может обладать. Для полного знакомства с частицей необходимо иметь данные о ее взаимодействиях со всеми другими частицами. Свойства этих взаимодействий пока до конца еще не изучены и служат предметом наиболее интенсивных исследований.

Наиболее поразительной развязкой взаимодействия частицы служит превращение частицы одного сорта в две или большее количество других более легких частиц. Например, предоставленный самому себе заряженный π-мезон проживет около двух стомиллионных долей секунды, после чего он самопроизвольно



ФИГ. 8. *Распад нестабильных частиц.*

На этой необычной фотографии, полученной в пузырьковой В точке *A* положительно заряженный *K*-мезон распадается μ-мезон и невидимое нейтрино. В точке *C* μ-мезон распадается на Λ-частицу и π-мезон. В точке *E* невидимая



камере, видеи распад пяти различиых элемеитарных частиц. на три π-мезоиа. В точке *B* одии из этих π-мезоиов распадается на дается иа позитрои (и два нейтриио). В точке *D* Ξ-частица распа- нейтральиая Λ-частица распадается на протон и π-мезон.

исчезает, уступив место обычно μ-мезону и нейтрино, а иногда электрону и нейтрино (фиг. 8). Про π-мезон говорят, что он распадается на две более легкие частицы. Большинство известных нам частиц неустойчиво и распадается различными способами спустя очень непродолжительное время. В табл. 1 приведены характерные времена жизни известных частиц и типичные способы распада, относительно которых эти частицы оказываются неустойчивыми. Устойчивы лишь протон, электрон и частицы, лишенные массы, т. е. только эти частицы, насколько нам известно, обладают бесконечно большим временем жизни.

Если бы электрон и протон не были устойчивыми, то человеку было бы куда сложнее изучать элементарные частицы. Устойчивость частиц, лишенных массы, не имеет значения с точки зрения построения вещества, поскольку фотон, гравитон и нейтрино нельзя собрать вместе и удержать на одном месте, чтобы использовать в качестве кирпичей мироздания. Эти частицы всегда будут разлетаться со скоростью света. Лишь протон и электрон могут быть подходящим строительным материалом Вселенной. Кроме того, благодаря счастливой удаче нейтрон в результате соединения с протонами может приобретать устойчивость. Одинокий нейтрон по истечении среднего времени жизни (примерно 17 *мин*) распадается на протон, электрон и антинейтрино. Но если нейтрон связан с протоном, то силы притяжения, удерживающие их вместе, вызовут уменьшение энергии нейтрона, которое в свою очередь воспрепятствует его распаду. Как это происходит на самом деле (этот эффект зависит от эквивалентности массы и энергии), мы обсудим в главе шестой. Без подобного стабилизирующего эффекта окружающий нас мир состоял бы из одного водорода, ибо только атомы водорода построены из протонов и электронов (по одной частице каждого сорта). Существование в природе всех прочих веществ обусловлено именно тем, что ядерные силы оказываются достаточно мощными для придания устойчивости нестабильному в обычных условиях нейтрону. Благодаря этому нейтрон присоединяется к кирпичам мироздания.

В связи с тем, что большинство частиц имеет невероятно малые времена жизни, может возникнуть желание спросить: почему они кажутся столь важными? Значение протона несомненно: эта частица входит в состав всей материи, живой и неживой. Но почему важна, скажем, Λ-частица, которая вовсе не является составной частью ни одного из известных объектов? При достаточно мощном ядерном столкновении, которое осуществляется при посредстве созданного человеком ускорителя, может быть рождена Λ-частица. Пролетев несколько сантиметров менее чем за одну миллиардную долю секунды, эта частица внезапно распадается на нуклон и π-мезон. Спустя несколько более продолжительное время π-мезон распадется на μ-мезон и нейтрино. А затем очень скоро произойдет и распад μ-мезона на электрон, нейтрино и антинейтрино. За миллионную долю секунды и всего в пределах нескольких футов от места первоначального соударения произойдет рождение и гибель ряда частиц, которые не оставляют в мире никакого следа, не считая появления еще нескольких нейтрино.

Существует две причины, на основании которых физики полагают, что короткоживущие нестабильные частицы столь же важны и интересны, как и немногочисленные устойчивые частицы, из которых построен окружающий мир. Прежде всего нестабильные частицы могут оказывать исключительно важное влияние на свойства стабильных частиц. Приведем наиболее яркий пример: сила, обеспечивающая существование всех ядер тяжелее ядра водорода, обусловлена обменом ядерных частиц нестабильными π-мезонами. Вторая, вероятно более глубокая, причина заключается в том, что принадлежность частиц к стабильным или нестабильным кажется чисто случайной. Например, μ-мезон и электрон кажутся очень сходными во всех отношениях, исключая то обстоятельство, что μ-мезон тяжелее электрона. Поэтому μ-мезон способен выделять избыток своей энергии и самопроизвольно распадаться на электрон и два нейтрино. Жизнь μ-мезона длится две миллионные доли секунды, а электрон, по-видимому, бессмертен. И все же это различие меньше удивляет физиков, нежели многочисленные сходства этих частиц. Вряд ли когда-либо удастся

познать «истинную» природу электрона, не поняв в то же время сущности близкого ему μ-мезона.

Все элементарные частицы, по-видимому, принадлежат к одному большому семейству, причем каждый член этого семейства зависит от всех остальных. Для элементарных частиц «обычен» распад с превращением одной частицы в другие, более легкие. По некоторым, до конца неясным причинам существуют две «аномальные» частицы — протон и электрон, для которых распад запрещен. Согласно более широкому взгляду на частицы, существуют определенные законы природы (см. главу четвертую), запрещающие распад этих двух частиц. Эта «случайность» делает возможным построение материального мира.

Конечно, поскольку существует единая Вселенная с едиными законами природы, то нет большого смысла утверждать, что то или иное положение вещей обязано случаю. Однако это представление о множественности частиц является продолжением процесса, начатого еще Коперником и состоящего в том, что человек все в большей степени чувствует свое ничтожество перед лицом Вселенной. Мы и наш мир существуем по милости законов сохранения, которые делают устойчивыми некоторые частицы и обеспечивают возникновение упорядоченных предметов из обычного хаоса микромира.

В табл. 1 приведена еще классификация по следующим семействам: барионы (тяжелые частицы), мезоны (промежуточные частицы), семейства μ-мезона и электрона. Два последних семейства, т. е. μ-мезон, электрон и соответствующие им нейтрино, известны под названием лептонов (легких частиц). К семейству мезонов принадлежат π-, η- и *K*-мезоны. Протон и все более тяжелые частицы — нейтрон, Λ, Σ, Ξ и Ω — принадлежат к семейству барионов. Классификация по семействам означает нечто большее, нежели классификация по массам. Так, мы видим из табл. 1, что спин лептонов и барионов равен $^1/_2$, тогда как спин мезонов равен 0. Более важной причиной, по которой частицы разбиты на семейства, служит то обстоятельство, что внутри этих семейств действуют законы сохранения принадлежности к семейству. Когда исчезает один барион, на его месте появляется

другой. Именно закон сохранения числа барионов делает протон устойчивым. Протон не может распасться на более легкие частицы, поскольку он — самый легкий барион, и такой распад привел бы к невосполнимому уменьшению числа барионов. Аналогичные законы действуют в семействах μ-мезона и электрона, но их не существует для мезонов, которые, подобно фотонам, могут возникать и исчезать в любом количестве. Закон сохранения числа барионов проверен на опыте с феноменально высокой точностью, так что на ближайшие несколько сотен миллиардов лет мы гарантированы от всемирной катастрофы, связанной с неустойчивостью протона. Законы сохранения числа лептонов в обоих семействах проверены также вполне надежно. Тем не менее мы теоретически не понимаем причин, по которым в природе существуют эти законы.

Не подходит ли к концу эпоха открытия новых частиц? Было бы опрометчиво утверждать это. С 1954 г. не было открыто ни одной заряженной частицы (не считая Ω^-), длительность жизни которой была бы достаточна для того, чтобы частица успевала оставить след в пузырьковой камере. Может быть подобных частиц больше и нет. Все же начиная с 1960—1962 гг. было открыто μ-мезонное нейтрино и множество короткоживущих частиц — резонансов. По-видимому, список «элементарных» частиц будет еще расширяться, прежде чем произойдет его уменьшение. В него войдет набор частиц с временами жизни от неправдоподобно малых до бесконечно больших.

В этой книге мы в основном будем иметь дело с теми представлениями о природе, которые создавались или разъяснялись в результате изучения элементарных частиц. Но прежде чем перейти к этим вопросам, очень важно уяснить смысл многочисленных понятий (таких, как заряд, масса и энергия), характеризующих поведение частиц, а также наглядно представить себе масштабы мира элементарных частиц. Этим целям служит глава вторая.

ГЛАВА
ВТОРАЯ

Большое и малое

Легко рассуждать о «неправдоподобно коротких» временах жизни элементарных частиц или о «фантастически малых» размерах атомных ядер. Гораздо труднее наглядно представить эти вещи. На рубежах микромира (как, впрочем, и космоса) человек настолько порывает с обычными масштабами, доступными его органам чувств, что необходимы довольно большие усилия его воображения, чтобы установить связь этих новых рубежей с обычным миром. Однако эти усилия сторицей окупаются тем, что человек получает способность наглядно представить себе всю панораму строения вещества, от бесконечно малого до космически большого.

Чтобы описать природу, ученые используют ряд концепций, которые определены столь четко, что представляют собой не просто качественные, а количественные, поддающиеся измерению понятия. Простейшими из них являются понятия размера (измерение длины) и длительности (измерение времени). Все свойства элементарной частицы — ее масса, электрический заряд, энергия,

спин, момент количества движения — это такие же количественные понятия. Грубо говоря, количественным мы называем понятие, которое характеризуется числом и наименованием, например 6 метров, 100 километров в час, 30 минут, 110 вольт. (Однако число должно обозначать величину или количество, а не порядковый номер; солдаты и моряки, например, хоть и имеют имя и номер, не подходят под это определение.)

Для каждого из понятий, используемых при описании природы, вводятся единицы измерений, которые позволяют проводить разумное сравнение результатов измерений, выполненных в различных местах и в различные моменты времени. Совсем непросто рассказать о том, что всем известно из повседневной жизни.

Наш рост выражается в метрах или сантиметрах, вес — в килограммах, а возраст — в годах. Для каждой величины необходима единица измерения, в которой она выражается. К сожалению, пока нет международного соглашения относительно единиц измерений (хотя в науке в этом отношении гораздо больше порядка, чем в повседневной жизни), но эта множественность единиц измерения лучше всего иллюстрирует их необходимость. Если спросить человека, сколько он весит, то американец может сказать: «Я вешу 154», англичанин той же комплекции назвал бы цифру 11, а француз заявил бы, что он весит 70. Все веса были бы, конечно, одинаковыми, но американец имел в виду фунты, англичанин стоуны, а француз килограммы. Называть цифру, не указывая единиц измерения, довольно бессмысленно, хотя в узком кругу лиц по общему согласию единицы могут подразумеваться и их поэтому могут не уточнять.

Наука имеет дело с некоторыми «чистыми», или безразмерными, числами. Эти числа, с точки зрения ученых, таят в себе особую прелесть, так как они как раз не зависят от выбора единиц измерения. Если мы говорим: «В табл. 1 приведены частицы тринадцати типов», то «тринадцать» будет чистым числом, результатом счета безотносительно к каким-либо единицам измерения. В основном величины, которые необхо-

димы для описания элементарных частиц, не требуют каких-либо единиц измерения.

Обычно используемые в науке единицы, такие, как сантиметр длины (сокращенно *см*) или секунда времени (*сек*), представляют собой единицы, приспособленные, с точки зрения человека, к явлениям окружающего нас макромира. Сантиметр, грубо говоря, равен толщине человеческого пальца; на протяжении секунды человек может несколько раз моргнуть, сказать «тысяча двадцать один» или пройти около сотни сантиметров. Этим единицам измерения удобно и легко дать наглядную характеристику. Но в мире большого, как и в мире малого, они становятся удивительно нелепыми. Расстояние от Земли до Солнца выражается баснословно большим числом сантиметров, а размеры атома водорода, наоборот, его крошечной долей. Возраст Земли составляет громадное число секунд, а время жизни π-мезона — незримую долю секунды. У журналистов есть пристрастие записывать числа, характеризующие мир космоса и микромир во всем их великолепии, т. е. в виде вереницы нулей до и после запятой, отделяющей целые от десятичных знаков. Так, π-мезон живет 0,000000026 *сек*; число атомов водорода в литре воды равно 60 000 000 000 000 000 000 000 000. Эти числа производят, конечно, огромное впечатление, но они несколько громоздки и не очень наглядны.

Поэтому ученые предприняли два шага. Первый и наиболее простой шаг состоял в том, что они заменили длинные, характерные для газет обозначения больших и малых чисел так называемыми степенями. В этом обозначении сто записывается как 10^2, тысяча — как 10^3, миллион — как 10^6, три миллиона — как $3 \cdot 10^6$, сорок миллиардов долларов — как $4 \cdot 10^{10}$ долларов. Длинное число в предшествующем абзаце как $6 \cdot 10^{25}$. Показатель степени у десяти указывает, на сколько знаков вправо сдвинута десятичная запятая. Два миллиона записывается в виде $2 \cdot 10^6$; это означает, что за цифрой 2 следует шесть нулей, 2 000 000. Подобное обозначение настолько просто и удобно, что каждый должен быть знаком с ним.

При умножении происходит *сложение* показателей степеней. Один миллиард представляет собой тысячу

миллионов: 10^6, умноженное на 10^3. Если свет распространяется ежесекундно на $3 \cdot 10^{10}$ *см*, а один год состоит из $3 \cdot 10^7$ *сек*, то световой год, т. е. расстояние, которое свет проходит за год, будет равно $3 \cdot 10^{10}$, умноженному на $3 \cdot 10^7$, т. е. $9 \cdot 10^{17}$ *см*. Это очень большое число; оно примерно в 300 млн. раз больше окружности Земли.

Если эту величину обратить в доллары и разделить между всеми обитателями Земли, то на долю каждого мужчины, женщины и ребенка пришлось бы около полумиллиарда долларов.

Использование степеней удобно и для обозначения малых чисел. Одна десятая — это 10^{-1}, одна миллионная — 10^{-6}, три миллиардных — $3 \cdot 10^{-9}$. Правило сложения показателей при умножении справедливо и в данном случае. Например, $10^{-3} \cdot 10^9$ равно 10^6. (Напомним, что прибавление отрицательного числа эквивалентно вычитанию положительного.) Иными словами, одна тысячная миллиарда равна одному миллиону. Время жизни μ-мезона равно $2 \cdot 10^{-6}$ *сек*, т. е. двум миллионным долям секунды. Размеры атома составляют около 10^{-8} *см*, или одну стомиллионную сантиметра.

Второй шаг в обращении с большими и малыми величинами состоит во введении новых единиц, которые больше подходят к масштабам рассматриваемой области. Так, для целей космологии удобной единицей длины является световой год ($9 \cdot 10^{17}$ *см*). Для атомов часто используется единица ангстрем, равная 10^{-8} *см*; для явлений, происходящих с ядрами и элементарными частицами, более подходящей оказывается в сто тысяч раз меньшая единица — ферми (10^{-13} *см*). В соответствии с этим подходом в табл. 1 значение спина фотона принято за единицу спина, заряд протона — за единицу заряда.

Кроме того, конечно, необходимо знать, каким образом совершается переход от этих единиц к обычным, подобно тому как необходимо знать связь между сантиметрами, дюймами, футами, ярдами, милями и световыми годами.

В табл. 2 собраны некоторые величины, характеризующие мир элементарных частиц.

ТАБЛИЦА 2

Единицы измерения физических величин

Физическая величина	Обычные единицы (макроскопические)	Единицы микромира
Длина	Сантиметр (примерно толщина человеческого пальца)	Размеры атома: примерно 10^{-8} *см* = 1 Å (1 ангстрем) Размеры элементарной частицы; примерно 10^{-13} = = 1 *ферми*
Скорость	Сантиметр в секунду (скорость улитки)	Скорость света = $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*
Время	Секунда (колебание маятника)	Естественная единица времени элементарной частицы: примерно 10^{-23} *сек* Типичное время жизни «долгоживущей» частицы: примерно 10^{-10} *сек*
Масса	Грамм (масса кубического сантиметра воды)	Масса электрона = $9 \cdot 10^{-28}$ *г*
Энергия	Эрг (энергия ленивого жука) Пищевая калория (40 млрд. *эрг*)	1 *эв* (электронвольт) = = $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *эрг* Молекулы воздуха имеют энергию примерно 1/40 *эв* В самых больших ускорителях протоны приобретают энергию около 30 млрд. *эв* (*Гэв*)
Заряд	Кулон (включение электрической лампы на 1 *сек*)	Заряд электрона = = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *кулон*
Спин	$г \cdot см \cdot \frac{см}{сек}$ (движение кузнечика)	Спин фотона = $= h = 10^{-27}\ г \cdot см \cdot \frac{см}{сек}$

Длина

Одним из лучших способов наглядного изображения очень большого или очень малого может служить аналогия. Так, чтобы охарактеризовать ядро, размеры которого составляют примерно 10^{-4}—10^{-5} от размеров атома, можно вообразить, что атом увеличился в поперечнике, скажем, до 3 *км*. Это соответствует длине взлетной дорожки большого аэропорта типа Нью-йоркского международного аэропорта, а 10^{-4} от этой величины составляет 30 *см* (около 1 *фут*); таков примерно размер баскетбольного мяча. А уж 10^{-5} — в десять раз меньше, что примерно соответствует диаметру мяча для пинг-понга. Итак, мяч для пинг-понга в центре Нью-йоркского международного аэропорта — вот примерно как выглядит протон в центре атома водорода. Баскетбольный мяч соответствовал бы тяжелому ядру, такому, как ядро урана. В этом масштабе 1 *см* увеличился бы до $3 \cdot 10^8$ (300 млн.) *км*, что примерно в два раза превышает расстояние от Земли до Солнца. Чтобы охарактеризовать число атомов в 1 *см*^{3} воды (несколько капель), представим себе, что земной шар устлан аэропортами, расположенными один подле другого. Затем поднимемся в высоту примерно на 1 *км* и окружим Землю еще одним «слоем аэропортов». Повторим эту процедуру 150 млн. раз. Последний слой достигнет Солнца и будет содержать свыше 10^{16} аэропортов. Число атомов в нескольких каплях воды будет эквивалентно числу аэропортов, заполнивших собой значительную часть Солнечной системы. Если бы ежегодно возникал 1 млн. аэропортов, то соответствующую строительную работу удалось бы завершить за известное время существования Вселенной (несколько больше 10 млрд. лет).

Размеры протона по порядку величины равны 10^{-13} *см*. Это расстояние получило название 1 *ферми* в честь Энрико Ферми, который в 1930 г. положил начало изучению ядерных частиц. В проведенных до настоящего времени экспериментах удалось проникнуть на расстояния порядка 0,1 *ферми*, или 10^{-14} *см*. Размер большинства элементарных частиц составляет около 1 *ферми*, но некоторые из них, как, например, электрон, могут оказаться гораздо «мельче».

Хотя мир космоса выходит за рамки предмета настоящей книги, любопытно все же сравнить астрономические размеры с субмикроскопическими. Известная нам часть Вселенной простирается примерно на 10^{10} световых лет, или 10^{28} *см*. Таким образом, человек, размеры которого по порядку величины составляют 10^{2} *см*, оказывается меньше Вселенной в 10^{26} раз, но больше протона «всего лишь» в 10^{15} раз. Вселенная во столько же раз больше Солнечной системы, во сколько раз человек больше протона. Самое малое из известных расстояний (10^{-14} *см*) отличается от самого большого расстояния (10^{28} *см*) в 10^{42} раз. Это число 10^{42} так огромно, что тут уж никакая аналогия нам не поможет. Допустим, что людское население увеличилось до 10^{42}. На земном шаре может разместиться лишь немногим больше 10^{15} человек и то при условии, что они станут вплотную, плечом к плечу. Миллион таких же планет, как Земля, могли бы дать пристанище 10^{21} человекам. Чтобы достичь желаемого (т. е. разместить 10^{42} человек), нам надо обязать каждую пару из этого миллиона планет обнаружить и заселить до предела еще миллион новых Земель. Для этого потребовалось бы всего 10^{27} планет, похожих на нашу Землю. Изрядное количество. Во всей Вселенной насчитывается около 10^{21} звезд. Если бы у каждой звезды было по 10 планет, а обитатели их были упакованы как сельди в бочке, то и тогда население Вселенной далеко не достигло бы цифры 10^{42}.

Изобретение способов наглядного изображения больших и малых чисел можно превратить в увлекательную игру. Пусть читатель попробует свои силы в этом направлении.

Скорость

Улитка, если будет очень торопиться, сможет передвигаться со скоростью около 1 сантиметра в секунду (сокращенно 1 *см/сек*). Пешеход передвигается со скоростью около 10^{2} *см/сек*, автомашина идет со скоростью $3 \cdot 10^{3}$ *см/сек*, а реактивный самолет мчится со скоростью, близкой к скорости звука, т. е. $3 \cdot 10^{4}$ *см/сек* (около 1100 *км/час*).

Человек не ограничен никакими расстояниями, ни

большими, ни малыми. Что же касается скорости, то здесь природа установила совершенно определенный предел, равный скорости света, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*. Это ровно в миллион раз больше скорости звука. Даже скорость, с которой движется космонавт, уступает скорости света в 40 000 раз. Космонавту требуется около полутора часов, чтобы облететь вокруг Земли, тогда как фотон, если бы его удалось заставить двигаться по криволинейной орбите, завершил бы подобное путешествие в десятую долю секунды. И все же здесь человек не так далек от вершины природы, как в случае пространства и времени.

Участвуя в непрерывном движении, происходящем в твердых телах, жидкостях или газах, атомы и молекулы выглядят довольно вялыми. Их скорость превышает скорость звука не более чем в 10 раз, т. е. остается в 10^5—10^6 раз меньше скорости света. Что же касается элементарных частиц, то для них довольно обычны скорости, сравнимые со скоростью света. У фотона и нейтрино, как и у гравитона, нет иного выбора, как двигаться в точности со скоростью света. На всех гигантских современных ускорителях частицы, обладающие массой (обычно электроны или протоны), разгоняются до скоростей, очень близких к скорости света, а нестабильные частицы, образующиеся в результате ядерных соударений, часто разлетаются со скоростью, близкой к предельной.

На страницах научно-фантастических романов мы часто читаем, что космонавты ускоряли свой корабль и проносились по Галактике со скоростью, превышающей скорость света. А есть ли какие-либо шансы, что так будет в действительности? Весьма маловероятно. И по очень простой причине. Чем легче объект, тем проще он поддается ускорению. Медленно набирает скорость товарный поезд, быстрее — автомашина, и еще гораздо быстрее — протон в циклотроне. Легче всего будет всегда ускоряться частица, не имеющая массы. В самом деле, лишенные массы фотоны, едва образовавшись, мгновенно приобретают скорость света. Но не больше. Если бы вообще что-нибудь смогло перемещаться быстрее света, то тогда и сам свет, состоящий из не имеющих массы фотонов, должен был бы распространяться с большей скоростью.

Время

Имея дело с масштабами времени элементарных частиц, следует прежде всего условиться, какой промежуток времени является «коротким», а какой — «длинным». Миллионную долю секунды, казалось бы, безусловно, следует отнести к коротким промежуткам, а для элементарных частиц это исключительно длинный промежуток времени. С другой стороны, миллионы лет подобны мгновению в величавом потоке космических событий.

Допустим, что, после того как на конце сборочного конвейера был завинчен последний болт, автомашина проехала всего несколько сот метров и затем внезапно развалилась на части. В таком случае мы бы сказали, что она имела малое время жизни. Если же машина, прежде чем развалиться, прошла 30 млрд. *км*, то мы бы сказали, что у нее было поразительно большое время жизни, фактически это была бы самая долгоживущая машина из всех, когда-либо существовавших. Переведем теперь эти расстояния на язык элементарных частиц. Размер частиц составляет около 10^{-13} *см*. Частица движется обычно со скоростью порядка 10^{10} *см/сек*. Таким образом, чтобы покрыть расстояние, в десять раз превосходящее ее собственные размеры (этот случай аналогичен автомашине, проехавшей всего 100 *м*), частице потребуется всего 10^{-22} *сек*. Промежуток времени 10^{-23} *сек* — это как бы естественная единица времени для частицы. Между тем почти все частицы, перечисленные в табл. 1, живут по крайней мере 10^{-10} *сек* — страшно долго по сравнению с 10^{-23} *сек*. За время 10^{-10} *сек* частица успевает пролететь целый сантиметр, что более чем в миллион миллионов раз превышает ее собственные размеры. Поэтому частица, прошедшая 1 *см*, похожа на автомашину, прошедшую 30 млрд. *км*. Каждая частица, имеющая возможность удалиться на 1 *см* от места своего рождения прежде, чем ее настигнет гибель, может быть названа долгоживущей. Живущие соответственно 10^{-8} и 10^{-6} *сек* π- и μ-мезоны могут удаляться гораздо больше чем на 1 *см*. С особым и непонятным случаем мы сталкиваемся при рассмотрении нейтрона. Его время жизни 17 *мин* — по мас-

штабам мира элементарных частиц практически бесконечно.

Недавно открытые новые частицы — «резонансы» — имеют времена жизни порядка 10^{-20} *сек* или меньше. Это действительно короткоживущие частицы. Они подобны автомашине, которая разваливается, не успев выехать за заводские ворота. У изготовителя могло бы появиться искушение заявить: «Не было никакой автомашины, а просто произошло лишь мимолетное событие» (для обозначения такого события физики используют слово «резонанс»).

Поскольку минимальное расстояние, на которое удалось проникнуть в экспериментах, составляет примерно 10^{-14} *см*, то можно сказать, что кратчайший известный промежуток времени составляет 10^{-24} *сек* (хотя столь короткий интервал пока лежит далеко за пределами возможностей прямых измерений). Самый большой из известных промежутков времени — это «время жизни Вселенной», т. е. кажущаяся продолжительность расширения Вселенной, которая в несколько раз превосходит возраст Земли. Оно составляет 10^{18} *сек* (или 30 млрд. лет). Отношение этих интервалов составляет 10^{42}, т. е. совпадает с тем огромным числом, которое характеризовало отношение самого большого расстояния к самому малому. Это совпадение не случайно. Самые далекие участки Вселенной удаляются от нас со скоростью, близкой к скорости света. И с такой же скоростью, близкой к скорости света, движутся частицы, несущие нам сведения о строении микромира. На передовых рубежах и космоса, и микромира скорость света играет роль связующего звена в измерениях пространства и времени.

Масса

Техническое определение массы оказывается довольно сложным, и у нас нет необходимости вникать в его детали. Для наших целей вполне достаточно представлять себе массу предмета как количество вещества в нем. Это очень нестрогое, ненаучное определение, но оно дает нам представление о массе. Смысл массы несколько запутан тем обстоятельством, что

сила тяжести, действующая на предмет, пропорциональна его массе. Посылка с большой массой притягивается к Земле сильнее, чем посылка с меньшей массой, и, следовательно, почтовые весы в первом случае делают больший отсчет. Мы говорим про более массивный предмет, что он «весит» больше. Это означает, что он сильней притягивается к Земле, причем, как оказывается, строго пропорционально своей массе.

Чтобы несколько лучше познакомиться с понятием массы, представим себе космонавтов, свободно парящих в кабине космического корабля в состоянии невесомости. Если двое из них возьмутся за руки, а затем оттолкнутся друг от друга, то они «поплывут» в разные стороны. При этом больший из космонавтов будет лететь несколько медленнее, чем его несколько меньший партнер. Это обстоятельство мы приписываем большей массе первого космонавта. Важное качество массы состоит в том, что она является мерой того сопротивления, которое тело оказывает попытке изменить ее движение. Это свойство обычно называют *инерцией.* Если парящий в центре кабины космонавт бросит мяч, то после броска он медленно «поплывет» назад, тогда как мяч быстро полетит в противоположном направлении. Если мяч будет лететь в 500 раз быстрей космонавта, то это значит, что масса мяча составляет лишь одну пятисотую от массы космонавта и, следовательно, оказывает в 500 раз более слабое сопротивление приводящему его в движение воздействию. Каждый, кто когда-нибудь стрелял из ружья, знаком с явлением отдачи. Если бы стрелок обладал такой же массой, как пуля, то и он, и пуля приобретали бы одинаковую скорость. Но поскольку масса стрелка, а следовательно, и инерция значительно больше, чем у пули, то он гораздо сильнее сопротивляется приведению его в движение и движется значительно медленнее, чем пуля.

С точки зрения обычных масштабов массы элементарных частиц крайне малы. Поэтому им сравнительно легко сообщить большую скорость, и они, как правило, движутся со скоростью, близкой к скорости света. Частицы, лишенные массы, вообще не оказывают сопротивления ускорению и, едва родившись, уже в тот же миг движутся со скоростью света.

Электрон представляет собой самую легкую частицу с конечной массой. Поэтому массу электрона принимают за единицу измерения массы микромира, как это сделано в табл. 1. Самая тяжелая Ω^--частица тяжелее электрона более чем в 3300 раз, и тем не менее даже миллион миллионов Ω^--частиц не могли бы нарушить равновесия самых чувствительных в мире весов.

В науке в качестве единицы измерения массы используется грамм (сокращенно *г*), 1 литр воды имеет массу 1000 *г*. Пассажиру воздушного лайнера разрешается брать с собой багаж массой 30 000 *г*, или 30 *кг*. Масса электрона составляет $9 \cdot 10^{-28}$ *г*, а «тяжелой» Ω^--частицы — около $3 \cdot 10^{-24}$ *г*.

Чтобы закончить разговор о массе замечанием по поводу космических проблем, зададим вопрос, какова масса Вселенной? Ее величина точно не известна, однако можно сделать грубую оценку. Вселенная содержит около 10^{23} звезд (это число примерно совпадает с числом молекул в 1 *г* воды). В среднем звезда весит 10^{35} *г*, так что полная масса составляет что-то около 10^{58} *г*. Каждый грамм вещества содержит примерно 10^{24} протонов, так что в известной нам части Вселенной по очень грубым оценкам содержится 10^{82} протонов[1]).

Энергия

Самым замечательным свойством энергии является ее способность к превращениям. Подобно гениальному актеру, способному менять свой облик, энергия проявляется в самых разнообразных формах, переходя из одной в другую. Благодаря этому богатству форм энергия выступает почти в каждом описании явлений природы и имеет все основания считаться самой важной из научных концепций.

[1]) Известная часть Вселенной предположительно содержит сходное число электронов (10^{82}), несколько меньше нейтрино (вероятно, около 10^{79}) и бессчетное количество фотонов и гравитонов. А вот нестабильных частиц гораздо меньше, чем протонов.

Одной из наиболее обычных форм является энергия движения, кинетическая энергия, служащая мерой того, какой величины силу, на протяжении какого пути надо приложить к телу, чтобы привести его в движение или остановить. Чем быстрее движется тело, тем больше его кинетическая энергия. Это совпадает с нашим повседневным пониманием окружающего. Например, характеризуя кого-либо как «энергичный», мы имеем в виду человека, находящегося в постоянном движении и очень работоспособного. Сама работа имеет строгое физическое определение: это сила, умноженная на расстояние, а энергия — это способность совершать работу. Работу может производить при надлежащем преобразовании любая форма энергии. Например, тепловая энергия представляет собой запас кинетической энергии беспрестанно и хаотично движущихся молекул, а паровая машина — устройство для извлечения из этой энергии механической работы.

Огромное значение энергии обусловлено частично многообразием ее проявлений, а частично тем обстоятельством, что энергия сохраняется. Сохранение энергии означает, что полное ее количество всегда остается одним и тем же и уменьшение энергии одного рода компенсируется увеличением энергии другого рода. Проследим, например, приток солнечной энергии к людям на Земле. Этот пример проиллюстрирует как разнообразие, так и сохранение энергии. В недрах Солнца при слиянии протонов в ядра гелия выделяется ядерная энергия. Эта энергия первоначально носит характер кинетической энергии движущихся ядер, которые вносят свой вклад в запас тепловой энергии Солнца. Часть энергии затем уносится фотонами — частицами, которые представляют собой сгустки электромагнитной энергии. Энергия фотона может превратиться благодаря сложным и до конца еще не понятым процессам фотосинтеза в химическую энергию, запасенную растениями. Питаясь растениями или мясом животных, которые в свою очередь поедают растения, человек тем самым потребляет солнечную энергию, которая согревает его, придает бодрость его духу и силу мышцам.

В начале нашего века было установлено, что с массой связана еще одна из форм энергии. Энергия, связанная с массой, и энергия движения представляют собой две наиболее распространенные формы энергии в мире элементарных частиц. Энергию, связанную с массой, можно представить себе как собственную энергию, или «энергию бытия». Вещество обладает запасом энергии уже благодаря самому своему существованию. Материальная частица в этом смысле есть не что иное, как сконцентрированный и локализованный сгусток энергии. Количество этой сконцентрированной энергии у покоящейся частицы пропорционально ее массе. Если частица движется, то она приобретает еще дополнительную энергию — кинетическую энергию. У лишенной массы частицы, например фотона, имеется только энергия движения и нет собственной энергии (связанной с массой).

Знаменитая формула Эйнштейна

$$E = mc^2$$

связывает массу частицы m с ее собственной энергией E. Величина c в этой формуле представляет собой скорость света; c^2 обозначает $c \times c$, т. е. квадрат скорости света. Важное утверждение, содержащееся в уравнении Эйнштейна, состоит в том, что энергия пропорциональна массе. Удвоенная масса подразумевает удвоенную собственную энергию; отсутствие массы означает отсутствие и собственной энергии. Множитель c^2 называется коэффициентом пропорциональности; он превращает единицы измерения массы в единицы измерения энергии. По аналогии рассмотрим уравнение, описывающее стоимость заправки автомобиля горючим,

$$C = GP.$$

Стоимость C равна числу литров горючего G, умноженному на P — цену 1 *л*. Стоимость пропорциональна объему горючего, а P играет роль коэффициента пропорциональности, который переводит число литров в полную стоимость. Аналогичным образом c^2 есть своего рода цена. Так что эквивалентная единичной массе энергия есть цена, которую следует уплатить энергией, чтобы получить единицу массы.

При отдельном ядерном столкновении или реакции в замкнутой системе полная энергия остается неизменной. Практически любое событие, происходящее в микромире, оказывается *изолированным,* так как расстояния, на которых частицы взаимодействуют друг с другом, как правило, крайне малы по сравнению с расстоянием между соседними атомами (порядка 10^{-8} *см*). Отдельные события происходят с частицами, которые фактически не подозревают о существовании чего-либо еще во Вселенной. При столкновении, реакции или в процессе распада энергия может поставляться из двух источников. Если частица замедляется, то при этом выделяется часть ее кинетической энергии; если происходит расщепление частицы, обладающей массой, то выделяется часть ее собственной энергии. Аналогично и потребление энергии может происходить двумя способами: может происходить ускорение частицы или рождаться новая частица. Закон сохранения энергии может быть сформулирован следующим образом: полное количество поставляемой энергии должно быть равно полному ее потреблению; потери энергии должны равняться выигрышу в энергии.

Рассмотрим в качестве примера распад покоящегося π-мезона. Поскольку частица не движется, единственной энергией, которой она обладает, является ее собственная энергия, связанная с массой. Самопроизвольно она распадается на μ-мезон и нейтрино. Исчезновение π-мезона открывает доступ к его собственной энергии. Часть ее идет на создание массы более легкого μ-мезона. Остальное превращается в энергию движения, и μ-мезон и нейтрино разлетаются с большой скоростью. Их кинетическая энергия в точности компенсирует этот остаток. Этот пример показывает, почему частица может самопроизвольно распадаться только на более легкие частицы. С другой стороны, при столкновении частиц высокой энергии, происходящем на ускорителях, бомбардирующая частица может замедлиться и часть ее кинетической энергии может пойти на образование массы новых частиц. Именно таким путем в современных лабораториях создаются антипротоны и другие частицы.

Человек, оплачивающий счет за пользование электричеством, а также тот, кто следит за своим весом, знакомы по крайней мере с двумя принятыми в обиходе единицами измерения энергии: киловатт-часом и калорией. Десять электроламп мощностью 100 ватт каждая потребляют 1 киловатт (*квт*). Если все они включены и горят один час, то при этом расходуется 1 *квт-час* энергии. Это и есть та электроэнергия, которую мы оплачиваем. Тучный человек мог бы заметить, что за калории тоже приходится расплачиваться. Одна калория эквивалентна энергии, выделяющейся при окислении довольно большой пригоршни сахара. Для поддержания нормального жизненного тонуса организму человека ежедневно необходимо несколько тысяч калорий.

Обычно в физике используют единицу энергии, называемую *эрг*. Это довольно мелкая единица; она соответствует энергии движения жука весом 2 *г*, ползущего со скоростью 1 *см/сек*. К примеру, калория составляет около 40 млрд. *эрг* ($4 \cdot 10^{10}$), а 1 *квт-час* — почти в тысячу раз больше, т. е. $3{,}6 \cdot 10^{13}$ *эрг*. И тем не менее эрг по своим масштабам оказывается больше тех энергий, с которыми мы обычно сталкиваемся в микромире. Здесь введена иная единица измерения энергии — электронвольт (сокращенно *эв*); это последняя из единиц измерения энергии, которые здесь мы упоминаем. Электронвольт составляет одну миллионную от одной миллионной доли эрга (точнее $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *эрг*) [1].

Средняя кинетическая энергия непрестанного хаотического движения атомов и молекул может служить своего рода эталоном для сравнения энергий в мире сверхмалого. При обычной температуре молекула движется в среднем с кинетической энергией, составляющей примерно $^1/_{40}$ *эв*. На горячей поверхности Солнца подобное тепловое движение в среднем соответствует примерно $^1/_2$ *эв*. В ускорителях частицы могут быть легко ускорены до значительно больших энергий.

[1]) Электронвольт — это энергия, которую получает электрон, пройдя разность потенциалов в 1 *в*. В электронвольтах можно измерять энергию (включая собственную) любой элементарной частицы.

В первых циклотронах протоны разгонялись до энергий, превышающих один миллион электронвольт (1 *Мэв*). Созданные в период после второй мировой войны ускорители позволили ускорять протоны вплоть до миллиарда электронвольт (1 *Гэв*). Беватрон в Беркли ускоряет протоны до энергии 6 *Гэв*. Самые большие ускорители, введенные в действие в 1962 г., находятся в Брукхэйвене (США) и Женеве (Швейцария). В них ускоряются протоны до энергии 30 *Гэв*. Некоторые из частиц космического излучения, приходящего к нам из космоса, несут энергии, значительно превышающие эту величину. Каким образом эти частицы ускоряются до столь высоких энергий — остается загадкой.

Поскольку масса и энергия эквивалентны, то какую энергию необходимо затратить для создания элементарной частицы? Для образования самой легкой частицы, электрона, требуется 500 000 *эв*. Старые ускорители могли сообщать энергию, достаточную для создания позитронов и электронов. Однако масса протона эквивалентна почти 1 *Гэв*. Рождение антипротонов следовало ожидать после завершения строительства Беватрона на энергию 6 *Гэв*. На новых ускорителях на энергию 30 *Гэв* может происходить рождение всех известных частиц со значительным избытком энергии. Вполне возможно, что с помощью этих ускорителей будут открыты новые, еще более тяжелые частицы.

Собственная энергия представляет собой могущественную и в высшей степени концентрированную форму энергии. Об этом убедительно напоминает мощь атомного оружия, в которой в энергию превращается не более десятой процента массы. Чтобы сравнить эти данные с приводившимися выше энергетическими эквивалентами, напомним типичную величину энергии теплового движения. Даже на раскаленной до бела поверхности Солнца кинетическая энергия протонов не превышает 1 *эв*. Эта энергия ничто по сравнению с миллиардом электронвольт, заключенным в массе протона. Если выделить на Земле энергию, запасенную в массе только одного протона, то ее хватит, чтобы нагреть миллиард атомов до температуры, превышающей температуру поверхности Солнца.

Заряд

Электрический заряд скорее всего следует уподобить французским духам. Это нечто такое, что присуще частицам и делает их привлекательными, особенно для частиц противоположного типа. Частицы, лишенные заряда, называют нейтральными; эти частицы не оказывают влияния (по крайней мере электрического) на другие частицы. Благодаря наличию заряда частицы объединяются парами. К примеру, атом водорода состоит из протона и электрона, удерживаемых вместе электрическим притяжением. Электрические силы не в состоянии удержать более энергичные частицы; они просто вынуждают эти частицы слегка отклониться от прямого курса.

Заряд частицы может быть либо положительным, либо отрицательным. Два заряда одного знака взаимно отталкиваются, два заряда противоположных знаков взаимно притягиваются. Так, протоны внутри ядра отталкивают друг друга, но их удерживают более мощные ядерные силы. Однако в конце концов у очень тяжелых ядер электрическое отталкивание оказывается больше противодействия ядерных сил, и ядро разваливается на части. Вот именно по этой причине в природе не существует ядер тяжелее урана.

Заряды получили наименование положительного и отрицательного совершенно произвольно, в результате исторической ошибки. Определение, согласно которому электрону приписан отрицательный заряд, а протону — положительный, обязано своим происхождением догадке Бенджамена Франклина и относится к середине XVIII века. Знак заряда электрона Франклин выбрал, основываясь на ошибочном предположении, что легче всего от одного предмета к другому переходит электричество положительного знака. Теперь мы знаем, что подвижны отрицательные электроны и именно они ответственны за электрический ток в металлах.

Электрический заряд до сих пор еще для физика загадка. Его свойства физик объяснит ненамного лучше, чем воздействие французских духов. Если представлять себе частицу в виде миниатюрной системы,

сосредоточенной в пределах крошечной области пространства, то естественно считать, что ее заряд также распределен по этой области. Но если это так, то почему различные участки заряда, составляющего частицу, не отталкиваются друг от друга и не приводят к расщеплению частицы на части? Никто не может дать удовлетворительного ответа на этот вопрос. Вызывает также недоумение и тот факт, что величина электрического заряда у всех частиц одна и та же. Если обозначить заряд электрона через $-e$ (он отрицателен), то заряд любой другой частицы будет равен либо $-e$, либо $+e$, либо нулю. Других зарядов в природе не встречается[1]). У нас нет объяснения этому факту, как нет и ответа на вопрос, почему электрон имеет такой электрический заряд, а не какой-либо другой. Истинная природа электрического заряда и причина, по которой он проявляется только в виде определенной порции, принадлежат к числу наиболее важных проблем физики элементарных частиц.

То обстоятельство, что у нас нет глубокого понимания природы электрического заряда, ни в какой мере не препятствует широкому использованию заряда в практических целях. Электроны довольно легко могут быть удалены из атомов (по крайней мере в ряде металлов, называемых проводниками). С помощью электрических сил их можно заставить двигаться по проводам или пролетать через пустое пространство, как в радиолампе или телевизионной трубке. Почти все приборы тонкого управления и существующие во всем мире средства связи обязаны своим действием электронам в различных схемах. Электроны взяли на себя также часть производимой в мире тяжелой работы, вращая моторы или создавая тепло.

Наличие напряжения на гнездах штепсельной розетки означает, что электрическая сила способна совершать работу. Если включить электрическое освещение, то электроны потекут от одного гнезда штепсельной розетки через лампу (в которой они израсходуют часть своей энергии в виде света и тепла) к другому гнезду. Число электронов в таком по-

[1]) См. наше примечание на стр. 36. — *Прим. перев.*

токе огромно. В обычной электролампе, освещающей комнату, через нить ежесекундно протекает около 10^{19} электронов. В тяжелой промышленности или высоковольтных линиях электропередачи между городами это число намного больше. Даже в крошечных и самых тонких электронных схемах ежесекундно протекают многие миллиарды электронов.

При расчесывании сухих волос с них отрываются, по-видимому, многие миллионы электронов, «прилипающих» к расческе. А ведь расческа остается почти незаряженной, ибо на каждый приобретенный ею дополнительный электрон в ней находится миллион миллионов нейтральных атомов. К счастью для нас предметы окружающего нас макромира почти всегда электрически нейтральны. Если бы расческу удалось наэлектризовать до такой степени, что на каждый атом приходился бы дополнительный электрон, то последствия этого были бы ужасны: между человеком и расческой при нейтрализации заряда произошел бы мощный, смертельный разряд молнии или гигантское электрическое притяжение с такой силой возвращало бы расческу, что она превратилась бы в опасное орудие.

По своей природе электрическая сила значительно превосходит гравитационную силу, и в масштабах микромира гравитационные силы можно вообще не учитывать. Однако в окружающем нас макромире существует столь точный электрический баланс, что гравитационные силы могут дать о себе знать. В каждом предмете нашего мира число положительных зарядов почти в точности равно числу отрицательных зарядов. Эти заряды почти полностью компенсируют друг друга, и то, что представляется нам заметным электрическим эффектом, происходит от ничтожного нарушения баланса положительного и отрицательного зарядов. Если когда-либо баланс нарушится сильно (а это совершенно невозможно), то произойдет бедствие, и приведет оно к тому, что сила тяжести потеряет свое значение.

Общепринятой единицей заряда является *кулон*, названная так в честь французского ученого Шарля Кулона, который открыл в 1785 г. точный закон электрического притяжения. Один кулон примерно

соответствует количеству заряда, которое ежесекундно протекает в лампе мощностью 100 *вт* или в электрическом утюге каждую пятую долю секунды. [В повседневном обиходе мы обычно сталкиваемся не с кулоном, а с очень тесно связанной с ним единицей измерения *ампером*. На электрических предохранителях может стоять пометка 5 ампер. Ампер (сокращенно *а*) есть один кулон в секунду. Если через предохранитель протекает ежесекундно 5 *а*, то провод внутри его расплавляется и цепь разрывается.]

Основной единицей электрического заряда в мире элементарных частиц является заряд электрона, $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *кулон*. Это меньше одной миллиардной от одной миллиардной доли кулона.

Спин

Вращательное движение, по-видимому, характерно для большинства объектов нашей Вселенной, от нейтрино до галактик. Наша Земля совершает один оборот вокруг своей оси за сутки, а один оборот вокруг Солнца за год. В свою очередь Солнце совершает один оборот вокруг своей оси за 26 дней и вместе с другими звездами нашей Галактики вращается в ней с периодом 230 млн. лет. Пока не известно, имеется ли у еще больших систем, таких, как группы галактик, общее вращение, но было бы странно, если бы его не было.

Переходя к более мелкому масштабу, мы видим, что атомы, входящие в состав молекул, могут вращаться относительно друг друга и действительно совершают такие вращения, причем скорость время от времени может изменяться вследствие взаимодействия молекул со своими соседями. В самом атоме электроны вращаются вокруг ядра со скоростью, которая составляет от 1 до 10% и более от скорости света. Это придает своеобразную жесткость сфере пустого пространства, по которой они движутся. Тот замечательный факт, что электроны вращаются также вокруг собственной оси подобно волчку, был обнаружен в 1925 г. Теперь мы знаем, что это врожденное вращение (или спин) присуще многим элементарным частицам.

Спин элементарной частицы в противоположность, скажем, вращению молекулы представляет собой неизменное свойство частицы и всегда имеет одно и то же определенное значение. Электрон нельзя удержать от вращения, и его вращение нельзя ускорить. Спин — это столь неотъемлемое свойство электрона, что изменить его, не разрушив самого электрона, нельзя. В действительности это довольно тонкий вопрос. По-видимому, более точно следовало бы сказать следующее: если электрон вынуждают вращаться быстрее, то это столь кардинально меняет его свойства, что получающуюся в результате систему следует рассматривать как совершенно новую, отличную от электрона частицу. В какой степ·ни различные частицы действительно независимы или представляют собой лишь различные состояния движения некоторой общей первоосновы — все это, конечно, большие и нерешенные задачи физики элементарных частиц, и было бы бесполезно продолжать эти рассуждения на страницах нашей книги. Можно лишь еще раз подчеркнуть, что физики продолжают верить в существование более простых объектов, лежащих в основе элементарных частиц.

Спин измеряется в терминах момента количества движения (см. главу первую), который служит одновременно мерой массы, размера и скорости вращения системы. Скорость вращения электрона, конечно, нельзя измерить, однако она должна быть настолько велика, чтобы заряд электрона двигался со скоростью, близкой к скорости света. Но несмотря на эту безумную скорость, электрон вследствие малости его массы и размеров не может обладать большим моментом количества движения. Человек, медленно поворачивающийся на своем стуле, чтобы следить за игрой в теннис, обладает моментом количества движения, по крайней мере в 10^{33} раз превосходящим момент отдельного электрона.

Электрон не только является носителем мельчайшего в природе электрического заряда, но играет ту же роль и по отношению неделимой единицы спина, которая (так исторически сложилось) обозначена как $\hbar/2$. На рубеже нашего века Макс Планк обнаружил, что в природе существует константа, связывающая

частоту и энергию фотонов (эта связь обсуждается в главе пятой). Мы называем теперь эту константу *постоянной Планка* и обозначаем ее через h. Спустя примерно десять лет Нильс Бор открыл, что эта константа имеет отношение и к вращению электронов в атоме вокруг ядра. Двигаясь по орбитам вокруг ядра, электроны обладают моментом количества движения, который всегда равен либо $h/2\pi$, либо удвоенному значению $h/2\pi$, либо утроенному значению $h/2\pi$ и т. д., но никогда не принимает промежуточных значений. Неудобство, вызванное необходимостью каждый раз выписывать множитель 2π послужило поводом для введения символа $\hbar$(h с чертой) для обозначения $h/2\pi$. Наконец, когда Самуэль Гоудсмит и Георг Уленбек открыли наличие электронного спина в 1925 г., они обнаружили, что спиновый момент количества движения равен не $\hbar$, величине, которую считали неделимой единицей, а лишь $\hbar/2$. Величина $\hbar$ была принята в качестве единицы измерения спинов и моментов количества движения частиц микромира, хотя наименьшей неделимой единицей оказалась лишь ее половина. В этих единицах все лептоны и барионы (кроме Ω^-) имеют спин, равный $^1/_2$, спин фотона равен 1, а спин гравитона равен 2.

Укажем, что $\hbar = 1{,}0544 \cdot 10^{-27}$ *г · см · см/сек* (единица масса×длина×скорость). Величина $\pi = 3{,}14159...$ встречается в геометрии как отношение длины окружности к диаметру круга.

Принцип квантования спина справедлив в макромире в той же мере, что и в микромире. Однако его влияние столь слабо, что вряд ли может быть замечено на больших объектах. Когда зритель во время теннисного матча следит за полетом мяча, его момент количества движения в единицах $\hbar$ может составлять 10^{33}, или $10^{33}+1$, или $10^{33}+2$, но никогда не бывает равен $10^{33}+{}^1/_3$. Приращение $\hbar$ при переходе от одного допустимого значения к другому так ничтожно мало, что нет никакой надежды обнаружить его в явлениях макромира. Не удивительно, что люди не смогли обнаружить квантовых свойств момента количества движения, пока не получили возможность детально изучить строение такой микросистемы, как атом.

Единицы измерения, используемые даже в научных исследованиях, определены произвольным образом; их выбор обусловлен просто соображениями удобства. Они не имеют ничего общего с «натуральными единицами измерения» и не находятся в каком-либо соответствии с основными принципами мироздания. Однако в этом веке мы узнали о существовании двух натуральных единиц измерения, которые теперь широко используются в физике элементарных частиц. Вполне возможно, что углубление нашего понимания природы элементарных частиц приведет к открытию третьей натуральной единицы измерения.

Первоначально метр был определен как одна десятимиллионная часть расстояния от полюса до экватора. (Это не совсем так, поскольку определение метра было дано в XIX веке, но наши представления о размерах Земли с тех пор были уточнены.) В свою очередь сантиметр представляет собой сотую часть метра. Грамм определяется как масса кубика воды с ребром 1 *см.* Таким образом, величина сантиметра и грамма зависит от размеров Земли, и нет никаких оснований считать, что эти размеры имеют какой-то особый смысл. Третья основная единица измерения — секунда — также связана со свойствами нашей Земли, ее скоростью вращения, и опять-таки ее выбор не имеет под собой особого основания. По причинам, не более веским, нежели те, на основании которых египтяне делили день и ночь на двенадцать частей, а в Вавилоне считали шестидесятками, час полагается равным одной двадцатичетвертой части суток, минута — одной шестидесятой части часа, а секунда — одной шестидесятой части минуты.

На протяжении первых пяти лет нашего века были открыты две натуральные единицы, которые можно выбрать в качестве основы для измерений в микромире. Это были скорость света c и постоянная Планка h. Ни одна из них не является непосредственно массой, длиной или временем, а представляет собой простую комбинацию этих трех единиц. Если бы удалось найти третью натуральную единицу измерения, то они составили бы основу для образования системы единиц, столь же полной, как грамм, сантиметр

и секунда, но гораздо более удовлетворительной. (Внимательный читатель мог бы предложить в качестве очевидного кандидата на место третьей натуральной единицы заряд электрона. К сожалению, эта величина не годится, так как она зависит от c и $\hbar$, подобно тому как скорость зависит от времени и расстояния.)

Уже на протяжении нескольких столетий было известно, что свет распространяется с постоянной скоростью c. Однако фундаментальное значение скорости света в природе стало ясно лишь после создания теории относительности. Эта теория прежде всего обнаружила, что c есть предельная скорость в природе, присущая не только свету, но и любой лишенной массы частице. Теория показала также, что эта константа встречается в самых различных и удивительных местах, не имеющих ничего общего со скоростью, например в соотношении между массой и энергией $E=mc^2$. Постоянная Планка впервые появилась в 1900 г., однако ее значение формировалось на протяжении нескольких десятилетий по мере того, как выяснялось, что это фундаментальная константа квантовой теории, задающая разрешенные значения не только спина, но и всех прочих квантовых величин.

Следует иметь в виду, что каждое измерение в действительности утверждает некоторое отношение. Если вы говорите, что весите 70 *кг*, то в действительности вы утверждаете, что ваш вес в 70 раз превосходит вес стандартного предмета (литра воды), который произвольно назван 1 *кг*. Пятидесятиминутный урок в 50 раз больше произвольно выбранной единицы времени — минуты. Если используются натуральные единицы, то речь идет об отношении не к произвольной единице, а к значащей физической величине. По натуральной шкале скорость реактивного самолета 10^{-6} c оказывается очень малой, а скорость частицы 0,99 c — очень большой. Момент количества движения 10 000 $\hbar$ очень велик, а момент количества движения $\hbar/2$ мал.

Вызывает трудности понимание следующего обстоятельства: раз скорость света выбрана в качестве единицы скорости, то нет смысла задавать вопрос, как быстро распространяется свет. Единственно воз-

можный ответ состоит в следующем: свет распространяется так, как распространяется. Так как каждое измерение представляет собой фактически сравнение, то должен существовать по крайней мере один стандарт, который не может быть сопоставлен ни с чем иным, кроме как с самим собой. При этом возникает мысль о «безразмерной физике». Приняв стандарт скорости, мы можем утверждать, что реактивный самолет летит со скоростью 10^{-6}, т. е. с одной миллионной скорости света. Величина 10^{-6} является безразмерной и не требует упоминания каких-либо единиц — это отношение скорости самолета к скорости света. Чтобы безразмерная физика стала возможной, необходима еще одна независимая натуральная единица, а ее мы пока еще не знаем. Если эта единица измерения будет обнаружена, она может оказаться единицей длины, и есть немало предположений, что такая единица будет связана с совершенно новыми представлениями о природе пространства (и времени) в масштабах микромира.

Следует добавить, что введение безразмерной физики не так перспективно, как это может показаться, и не обязательно есть конечная цель человеческих стремлений. Недостаточная глубина этого подхода обусловлена тем, что и безразмерная физика будет основана на произвольном соглашении людей о единицах измерения. Однако есть надежда, что все ученые естественным путем придут к общему мнению о единственно разумном наборе натуральных единиц измерения в противоположность существующему положению дел, когда единодушное мнение состоит лишь в том, что в единицах сантиметр, грамм и секунда нет особого смысла. Даже если безразмерная физика станет реальностью, еще останутся требующие объяснения безразмерные или чистые величины. А объяснения эти могут лежать на более глубокой ступени строения микромира.

ГЛАВА
ТРЕТЬЯ

Великие идеи физики XX века

Основной успех в понимании законов природы, достигнутый в этом столетии, связан с появлением двух больших теорий: теории относительности и квантовой механики. Эти теории вызвали к жизни ряд новых представлений, совершенно не соответствующих идеям «классической» физики (т. е. физики, предшествовавшей XX веку) и повседневному опыту. Человеку пришлось по-новому взглянуть на природу, и он был вынужден прийти к выводу, что «здравый смысл», почерпнутый из чувственного восприятия окружающего мира, может и не иметь непосредственного отношения к более глубокому пониманию строения вещества.

Прежде чем заняться обсуждением тех представлений, кои были порождены этими теориями, важно уяснить, что́ понимается под «теорией» в физике. Это *не голословное* утверждение или случайное объяснение, о которых иногда говорят: «О, так ведь это теория!». В действительности общая теория типа квантовой механики — нечто прямо противоположное. Это точное математиче-

ское описание, если угодно, «объяснение» определенного круга явлений природы, не имеющее исключений в пределах данной области. Теория электромагнетизма, которую можно выбрать в качестве примера из классической физики, *описывает и предсказывает* все электрические и магнитные явления в макромире. Эта теория проверена бессчетное число раз экспериментально. Она «точная» в том смысле, что ее предсказания абсолютно согласуются с опытом. И тем не менее по ряду причин она или любая другая теория может быть в конце концов отброшена.

Может обнаружиться исключение, показывающее, что область приложения теории у́же, чем это предполагалось. Потом может быть создана более совершенная теория, включающая старую теорию и расширяющая область ее применения. Возможно создание и совсем новой теории, кажущейся более простой и более стройной (что, впрочем, маловероятно). Строго говоря, даже теории, занимающие в науке наиболее прочные позиции, представляют собой временное объяснение, однако общие теории подкреплены столь обширными экспериментальными данными, что в их справедливости нет сомнений.

Одна из современных общих теорий — квантовая механика — объясняет явления, происходящие в микромире (движение элементарных частиц, силы, действующие между этими частицами, процессы рождения и аннигиляции частиц). Содержание теории относительности не так просто изложить в нескольких словах. С одной стороны, это теория теорий, налагающая на все другие теории требования, согласно которым все они должны быть одинаковы с точки зрения наблюдателей, находящихся в различных состояниях движения. С другой стороны, и этот аспект теории относительности особенно важен для нашего обсуждения элементарных частиц, это теория движения с большими скоростями не только частиц, обладающих массой (например, электронов), но и частиц без массы (например, фотонов). Поскольку элементарные частицы имеют малые размеры и движутся с большими скоростями, они подчиняются законам квантовой механики и теории относительности и

прекрасно иллюстрируют те революционные идеи физики XX века, которые эти теории породили.

Общая теория, такая, как квантовая механика, находит свое наиболее элегантное выражение на языке математики. Но для того чтобы теория приобрела права гражданства, небходимо дать интерпретацию ее математическому аппарату. Иными словами, надо знать, что́ означают различные символы? Как связать эти символы с наблюдаемыми в природе явлениями? Кроме того, с теорией тесно переплетаются некоторые идеи и представления об окружающем нас мире, играющие в науке увлекательную, но в то же время довольно туманную роль. С одной стороны, если стоять на чисто формальной точке зрения, то эти идеи составляют фасад теории, хотя и не являются ее неотъемлемой частью. С другой стороны, можно считать, что они составляют главный результат, даваемый теорией. В них сосредоточены те представления о природе, которые выкристаллизовываются в дебрях математики и эксперимента.

Человек, не имеющий прямого отношения к науке, должен отдавать предпочтение второй точке зрения, ибо как иначе он сможет приобщиться к достижениям науки? И для ученого независимо от того, принимает ли он эту точку зрения или отвергает, порождаемые новыми теориями представления имеют огромную важность. Они создают опору для нового прыжка в неизвестное. Ученый, ежедневно сталкивающийся в своей работе с теорией относительности и квантовой механикой, приобретает некую новую интуицию и понимание здравого смысла, которые, весьма возможно, явятся важными предпосылками для проникновения в еще более сокровенные глубины вещества. К сожалению, ученые — тоже люди, и живут они в окружающем нас макромире. Хотя они мирятся с новыми представлениями о природе и привыкают к ним, однако они не более, чем любой другой человек, в состоянии дать этим идеям наглядное выражение. Маловероятно, чтобы человек действительно смог наглядно представить себе четырехмерный мир или волну в одно и то же время как волну и частицу или, наконец, те странные вещи, которые происходят с пространством и временем для предмета, движуще-

гося со скоростью, близкой к скорости света. Остается открытым наиболее интересный вопрос — не станут ли макроскопические размеры человека и его ограниченное воображение в конце концов тем тормозом, который ограничит возможности человека в использовании природы, или, быть может, человек окажется в состоянии приспособиться к любым сколь угодно необычным представлениям, которые преподнесут ему новые эксперименты и новые теории.

В этой главе мы познакомимся с тремя «великими идеями» физики XX века и обсудим несколько примеров, заимствованных в мире элементарных частиц, для иллюстрации этих идей.

Вероятность

Одно из наиболее важных утверждений квантовой механики состоит в следующем: основные законы природы являются вероятностными законами. Если атом водорода переведен в «возбужденное состояние», т. е. если ему сообщили некоторую энергию, и вследствие этого электрон вынужден двигаться по более удаленной от ядра орбите по сравнению с нормальной (и атом предоставлен самому себе), то спустя некоторое время он сможет потерять избыток энергии в результате самопроизвольного испускания светового фотона. При этом электрон возвратится на более близкую к ядру орбиту. Промежуток времени, в течение которого атом остается в возбужденном состоянии, пока не испустится фотон, оказывается совершенно неопределенным и не может быть предсказан заранее. Однако можно точно вычислить *вероятность* испускания фотона на протяжении любого промежутка времени. Квантовая механика представляет собой однозначную количественную теорию в том смысле, что позволяет точно вычислять вероятности. Она оказывается неопределенной, если речь идет о том, что мы можем вычислить только вероятность какого-либо события, и не в состоянии ничего сказать о том, чтó произойдет с тем или иным атомом или системой. Отдельный атом никогда не поможет

нам сравнить расчетную вероятность испускания фотона с экспериментом. Для этого необходимо исследовать большой набор атомов и вывести вероятность испускания фотона отдельным атомом из поведения в среднем всего коллектива. Точно так же, бросив монету один раз, мы никогда не сможем доказать, что вероятность выпадения орла в точности равна половине. Для доказательства потребовалось бы многократно подбрасывать монету.

Распад нестабильных частиц просто и наглядно характеризует ту фундаментальную роль, которую играет вероятность. Если в идентичных условиях, скажем в мишени ускорителя, образуется большое число π-мезонов, то частицы, движущиеся с определенной скоростью в заданном направлении, могут быть сфотографированы в камере Вильсона. При этом окажется, что некоторые мезоны распадаются на μ-мезоны и нейтрино, пройдя очень небольшое расстояние, другие распадаются, пройдя несколько большее расстояние, а третьи — еще большее. Будет существовать некое среднее расстояние и соответствующее среднее время распада. Если этот опыт повторять время от времени, причем каждый раз с большим числом мезонов, то *среднее* время жизни π-мезонов в каждой группе будет в точности одним и тем же. Это среднее время — совершенно определенная величина, которая служит мерой вероятности распада π-мезона и которую можно измерить со сколь угодно высокой степенью точности, если использовать достаточно многочисленные группы π-мезонов. Тем не менее продолжительность жизни отдельного π-мезона остается неопределенной. Каждый π-мезон может погибнуть гораздо раньше своих компаньонов, а может пережить их всех.

Представление о том, что фундаментальные процессы в природе управляются вероятностными законами, должно было произвести впечатление взрыва бомбы. Но, как ни странно, этого не случилось. Это представление постепенно проникало в науку на протяжении первой четверти нашего века. Лишь очнувшись после полного завершения развития квантовой теории, примерно в 1926 г., физики и философы об-

ратили внимание на то, что наша интерпретация законов природы в корне изменилась[1]).

Еще в 1899 г. Эрнест Резерфорд и другие ученые, изучавшие незадолго до этого открытую естественную радиоактивность, обратили внимание на то, что радиоактивный распад атомов, казалось, подчинялся вероятностному закону. Созданные одинаковым образом радиоактивные атомы вели себя по-разному. Точно так же, как и в более современном примере с π-мезонами, некоторые атомы жили короткое время, а другие — более продолжительное. Постоянно лишь среднее время жизни любой группы атомов. Более того, отдельный радиоактивный атом может испытывать различные радиоактивные превращения, испуская, например, либо α-частицу, либо β-частицу. Какой способ выберет атом, чтобы окончить свой жизненный путь, — также предугадать невозможно. И все же Резерфорд и его коллеги не решились сказать во всеуслышание, что основные законы природы должны иметь вероятностный характер. Почему?

Ответ чрезвычайно прост. Они не поняли, что имеют дело с *основными* законами. В появлении в науке вероятности не было собственно ничего нового. Новым, но непонятным было то, что вероятность впервые оказалась участницей простых элементарных процессов в природе.

Классическая физика целиком опиралась на представление о детерминированном характере законов природы. Если о частице, световой волне или любой другой системе имелось достаточно сведений в определенный момент времени, поведение этой системы в будущем в принципе можно было точно предсказать. Нет проблемы в том, где окажутся Земля или Луна в будущем. Можно построить мост или сконструировать электромагнит, будучи твердо уверенным, что они не развалятся и не откажут в работе из-за непредвиден-

[1]) По-видимому, впервые *фундаментальную* роль вероятности в природе отметили Нильс Бор, Хендрик Крамерс и Джон Слэтер в 1924 г. Их попытка построить новую квантовую теорию оказалась неудачной, однако в следующем году Вернеру Гейзенбергу удалось добиться успеха, а в 1926 г. Макс Борн дал новой теории вероятностную интерпретацию, которая и по сей день остается краеугольным камнем квантовой механики.

ных отклонений в законах механики или электромагнетизма. Строгий детерминизм законов природы имел огромное влияние на философию XIX века. В то время была весьма распространена точка зрения, согласно которой Вселенную можно рассматривать как гигантский механизм — мировую машину, неумолимо и неустанно печатающую историю по предопределенному заранее плану.

Но из нашей повседневной жизни мы хорошо знакомы с вероятностью, и чтобы встретить ее, нет необходимости обращаться к миру элементарных частиц. Как хорошо знают агенты по страхованию жизни и игроки, жизнь, смерть и рулетка подвластны законам вероятности. Здесь мы приходим к очень важному вопросу. В макромире (и классической физике) появление вероятности обусловлено игнорированием чего-либо; в микромире вероятность присуща самим законам природы. Единственная причина, по которой не удается заранее предсказать место, где остановится шарик рулетки, это игнорирование того, что физики называют «начальными условиями». Если бы игрок знал все механические детали колеса, форму, размеры и массу шарика, точный закон трения в подшипниках и все детали способа, которым колесо приведено во вращение, он смог бы в принципе предсказать результат. Излишне говорить, что практически это невозможно, но «в принципе» осуществимо. Отличие квантовомеханических законов вероятности состоит в том, что нельзя ни в принципе, ни в действительности предсказать точный ход атомного события независимо от того, насколько точно нам известны начальные условия. Согласно квантовой механике, можно знать все о π-мезоне и все же не быть в состоянии предсказать момент его распада.

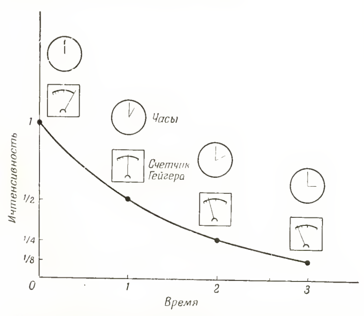
Теперь нам понятно, почему Резерфорд не удивился, открыв вероятностную природу радиоактивного распада. Он предполагал, что имеет дело с вероятностью, обусловленной игнорированием. Насколько ему было известно, атом имел сложное внутреннее строение, и кажущийся случайный характер процесса распада мог быть приписан неизвестному различию внутреннего состояния разных атомов. Но еще до того, как было завершено создание квантовой ме-

ханики (1925 г.), появились указания, что в микромире вероятность может иметь более фундаментальное значение. Резерфорд обнаружил (совместно с Содди в 1902 г.), что радиоактивность представляет собой внезапное и радикальное превращение атома, не являющееся результатом постепенного изменения. Само по себе это обстоятельство сделало радиоактивные превращения весьма фундаментальным событием. В 1905 г. Эйнштейн установил, что свет может поглощаться только определенными порциями (фотонами); созданная в 1911 г. Бором модель атома водорода также содержала указания на новую фундаментальную роль вероятности, однако мы не будем здесь подробно говорить об этих открытиях.

В мире элементарных частиц вероятность проявляется двумя путями. Прежде всего и наиболее непосредственно она обнаруживает себя в случайном характере явлений микромира. Любой, кто имеет часы со светящимся циферблатом и счетчик Гейгера (не такая уж редкость в наши дни), может выполнить простой эксперимент, иллюстрирующий вышесказанное. Счетчик Гейгера должен быть обычной конструкции и давать звуковой сигнал (щелчок) при попадании в него быстрой частицы. Часы держат на таком расстоянии от счетчика, чтобы отдельные щелчки можно было хорошо слышать. Для испытателя станет ясно, что в отличие от тиканья часов щелчки следуют нерегулярно и распределены во времени хаотически. И действительно, математический анализ покажет, что они строго случайны. Момент, когда слышится какой-то один щелчок, совершенно не зависит от величины промежутка времени, прошедшего с момента предыдущего щелчка или до возникновения последующего.

Проводя подобный эксперимент, ощущаешь необычайно близкое соприкосновение с микромиром. Каждый услышанный щелчок означает, что где-то среди бесчисленных миллиардов атомов, расположенных на циферблате часов, ядро одного из них внезапно и самопроизвольно выбросило частицу, движущуюся с большой скоростью, а само превратилось в другое ядро. Происходит буквально взрыв ядра, и момент, когда это случается, подчиняется исключительно

вероятностным законам, управляющим внутренним миром ядра. Возможно, что расположенное рядом точно такое же ядро давно распалось, а может, и просуществует еще длительное время.



ФИГ. 9. *Характер уменьшения полной интенсивности радиоактивного образца во времени.*

Вероятность проявляет себя и иным способом, не столь очевидно и наглядно, но столь же убедительно для каждого, хоть немного знакомого с математикой. Она находит свое выражение в экспоненциальном законе распада. В действительности именно это проявление вероятности в радиоактивном распаде и было обнаружено Резерфордом, так как в 1899 г. он еще не располагал средствами для наблюдения отдельных превращений (лишь несколько лет спустя его студент-практикант Ганс Гейгер изобрел свой знаменитый счетчик). Резерфорд заметил, что если нанести на график полную интенсивность радиоак-

тивного вещества в зависимости от времени, то получится кривая, сходная с изображенной на фиг. 9. Она называется экспоненциальной кривой. Наиболее примечательная особенность этой кривой состоит в том, что спад от любой точки по вертикали до половинного значения ординаты происходит на стандартном отрезке по горизонтали. В опытах Резерфорда это выглядело следующим образом: независимо от начального значения интенсивности радиоактивности для уменьшения ее наполовину требовалось определенное фиксированное время. Этот промежуток времени называется периодом полураспада материала.

Резерфорду было известно (мы упомянем это обстоятельство без доказательства), что экспоненциальная кривая есть результат подчинения отдельного акта радиоактивного распада вероятностному закону. Для каждого ядра период полураспада соответствует половине всех шансов. Вероятность распада ядра за меньший промежуток времени равна $1/2$, вероятность распада за больший промежуток времени также равна $1/2$. Если этот вероятностный закон проявляется в большом собрании идентичных ядер, то полная скорость радиоактивного распада будет плавно уменьшаться, следуя экспоненциальной кривой. То же самое справедливо и для элементарных частиц. Каждое приведенное в табл. 1 среднее время жизни [1]) получено в результате изучения экспоненциальной кривой распада частиц соответствующего сорта. (Сами времена обычно не измеряются, их выводят из измерений скорости частиц и пройденного ими расстояния.)

Диапазон известных периодов полураспада от самого короткого до самого длинного невообразимо велик. На одном конце этого диапазона — сверхкороткоживущие частицы, или резонансы, с периодом полураспада 10^{-20} *сек* и меньше. Более солидные частицы (см. табл. 1) живут от 10^{-10} *сек* до нескольких

[1]) В общем случае среднее время жизни не совпадает с периодом полураспада. В мире элементарных частиц период полураспада оказывается значительно меньше среднего времени жизни (они связаны множителем 0,694). Нейтрон со средним временем жизни 17 *мин* теряет половину своих сверстников спустя 12 *мин.*

минут, за исключением, конечно, стабильных частиц, которые, насколько нам известно, вечны. Известны радиоактивные ядра с периодами полураспада примерно от 10^{-3} *сек* до $3 \cdot 10^{10}$ лет. Независимо от периода полураспада распад любой нестабильной частицы неумолимо следует экспоненциальному закону.

Радиоактивность, возникающая в результате ядерных взрывов, вызвана смесью многих радиоактивных веществ, и сопровождающие испытание бомб осадки не обнаруживают простого экспоненциального спада радиоактивности. Некоторые радиоактивные ядра распадаются так скоро после взрыва (в пределах нескольких секунд или минут), что загрязняют лишь небольшую площадь и не представляют опасности для здоровья. Другие же имеют столь большой период полураспада (миллионы лет), что их скорость распада все время остается очень слабой. В промежутке существуют ядра с периодами полураспада от нескольких лет до нескольких сотен лет. Они-то и составляют потенциальную опасность осадков. Часто упоминающийся Co^{60} имеет период полураспада 5,3 года, а период полураспада Sr^{90} достигает 28 лет. При испытании бомб в атмосфере образуется также изотоп углерода C^{14}, который оказался весьма полезным при датировании археологических раскопок, так как период его полураспада равен 5770 лет. Есть опасения, что испытания сильно затруднят, если вообще не исключат использование этого метода археологами в ближайшие тысячелетия.

Мы сконцентрировали свое внимание на вероятности, относящейся к промежутку *времени*, характеризующему картину распада нестабильных частиц и ядер. Вероятность дает о себе знать и в других сторонах процессов микромира. Существует так называемая вероятность «разветвления». Так, *K*-мезон может распадаться различными способами, среди которых есть распады на два π-мезона или на μ-мезон и нейтрино. Какую из ветвей выберет тот или иной *K*-мезон, предсказать нельзя, однако вероятность каждой из ветвей вполне измерима (при наличии достаточного количества *K*-мезонов). Существует также вероятность рассеяния. Если одна частица

пролетает вблизи другой, то она может претерпеть отклонение. Квантовая механика позволяет вычислить лишь возможность заданного отклонения, но не сам факт отклонения.

Особенно красиво проявляется фундаментальная роль вероятности в «туннельном эффекте». Если частица находится по одну сторону стенки, совершенно непроницаемой с точки зрения классической физики, то имеется определенная вероятность, что частица появится и по другую сторону. Туннельным эффектом можно объяснить и α-распад ядер. Внутри ядра α-частица удерживается непроницаемой стенкой, создаваемой электрической силой. И все же с определенной, хотя и малой, вероятностью частица может проскочить сквозь стенку и улететь прочь, где ее появление можно зарегистрировать счетчиком Гейгера. Вероятность того, что человек, прислонясь к стене комнаты, неожиданно окажется в соседнем помещении, к счастью, много меньше вероятности вылета α-частицы из ядра. Если даже человек терпеливо простоит в таком положении миллиард лет, и то вероятность туннельного эффекта останется совершенно ничтожной. Поэтому студентам не следует рассчитывать, что туннельный эффект позволит им удрать со скучной лекции в комнату, расположенную этажом ниже. Туннельный эффект помогает частице избежать заточения и совершенно бесполезен для человека.

Мы завершим этот раздел несколькими общими замечаниями относительно вероятности. Во-первых, отнюдь *не для всех* аспектов характерны неопределенность и вероятностный характер. Многочисленные свойства стабильных систем (скажем, спин электрона или его масса) определены совершенно точно. Даже там, где господствуют вероятностные законы, вероятность события может оказаться настолько близкой к нулю или единице, что его осуществление или неосуществление можно считать практически достоверным. Вероятность туннельного эффекта для человека практически равна нулю. Вероятность распада протона на протяжении миллиарда лет, по существу, равна нулю (это показал опыт). Также практически равна

нулю вероятность того, что π-мезон просуществует два часа. В макромире квантовомеханические вероятности всегда оказываются столь близки к нулю или единице, что детерминированные законы классической физики вполне адекватно и достаточно точно описывают явления большого масштаба.

Действительно ли вероятность микромира — это фундаментальное свойство природы или это в конце концов вероятность игнорирования более сложной, более глубокой и еще не известной структуры вещества? Вокруг этого вопроса велись жаркие споры. Простейший ответ, который может быть дан: «Никто этого не знает». Большинство ученых считают этот вопрос не очень интересным. Поскольку нам ничего не известно о строении вещества на более глубокой ступени, то сейчас бесполезно обсуждать этот вопрос. Насколько известно в настоящее время, до сих пор вероятность носила фундаментальный характер, однако нет нужды придерживаться этих взглядов более твердо, чем каких-либо других представлений в науке.

Тем не менее ряд выдающихся ученых нашего века сочли этот вопрос интересным и обсуждали его. Те, кто придерживался мнения о фундаментальном характере вероятностных законов природы, имели некоторое преимущество, так как на их стороне были все успехи квантовой механики. А те, кто отдавал предпочтение мнению, что квантовомеханическая вероятность в действительности есть вероятность игнорирования, может прибегнуть в лучшем случае к аргументам не научного, а философского характера. Например, Эйнштейн любил говорить, что он не верит в игру провидения. Он писал в 1953 г. Максу Борну: «По моему убеждению, совершенно неудовлетворительно основывать физику на такой теоретической перспективе, поскольку, отметая возможность объективного описания, ... мы тем самым превращаем картину физического мира в призрак».

Аргументы в пользу фундаментального значения вероятности в природе оказались более тонкими и основывались на квантовой механике. Приведем здесь один из них. Изготовители бейсбольных мячей стараются делать их одинаковыми. Конечно, это не-

выполнимо. Нет таких двух мячей, которые оказались бы точно одинаковыми во всех микроскопических деталях, ибо каждый мяч — это сложная структура, содержащая огромное число деталей (свыше 10^{25}), если иметь в виду атомы. С другой стороны, имеются довольно надежные доказательства, что два любых электрона абсолютно идентичны и что для полного описания электрона требуется сравнительно небольшое число параметров. Короче говоря, электрон, несомненно, гораздо более элементарная система, нежели бейсбольный мяч. Это отнюдь не тривиальный вывод. Если бы существовало бесконечно много ступеней в глубь вещества, то электрон был бы по своей структуре таким же сложным, как и бейсбольный мяч. Поскольку электрон подчиняется вероятностным законам, то возникает подозрение, что эти законы по своему характеру являются элементарными и фундаментальными, а не просто отражают наличие сложной и неизвестной внутренней структуры электрона.

Хотя подобные аргументы звучат научно, они ничуть не строже утверждения Эйнштейна, основанного на убеждении. Нам остается лишь ждать.

Рождение и гибель частиц

Химия XIX века прочно покоилась на двух законах сохранения: законе сохранения массы и законе сохранения энергии. В начале нашего столетия теория относительности показала, что в принципе возможны взаимопревращения массы в энергию и наоборот. Теория не утверждала, что масса *должна* возникать или исчезать, а лишь открывала такую возможность. Но природа, подобно собаке на цепи, отыскивает способы делать все, что ей не запрещают. Открытие в 1932 г. позитрона явилось первым четким доказательством возникновения массы, а вскоре после этого созданная Ферми теория β-распада доказала, что испускаемые при β-радиоактивности электроны должны тут же и рождаться. Между тем с помощью квантовой механики были созданы теоретические основы для описания процесса, связанного с возникновением массы, и,

в частности, было показано, что рождение световых фотонов не имеет существенных отличий от образования частиц вещества. В середине тридцатых годов рождение и гибель частиц вещества были хорошо установлены. Мы знаем теперь, что любая частица может быть создана и может погибнуть. Все нестабильные частицы погибают самопроизвольно, а стабильные частицы могут исчезать, лишь аннигилируя со своими античастицами. При наличии достаточной энергии можно создать любую частицу — как стабильную, так и нестабильную.

Простейшим примером возникновения и уничтожения массы служит распад нестабильной частицы. В табл. 1 собраны некоторые типичные способы распада. При β-распаде нейтрона, который записывается в виде

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

гибнет нейтрон, а протон, электрон и антинейтрино рождаются. Это единственный способ распада нейтрона, если не считать редких случаев, когда происходит еще испускание фотона. С другой стороны, имеется большое число способов распада K-мезона. Например, положительно заряженный K-мезон может погибнуть одним из следующих способов:

$K^+ \to \pi^+ + \pi^0$ (21,5%),

$K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$ (63,1%),

$K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ (5,5%),

$K^+ \to \pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ (1,7%),

$K^+ \to e^+ + \nu_e$ (редко),

$K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu + \pi^0$ (3,4%),

$K^+ \to e^+ + \nu_e + \pi^0$ (4,8%),

$K^+ \to$ любой из написанных выше $+ \gamma$ (редко).

(Из-за наличия экспериментальных ошибок сумма не дает точно 100%.) Символами π, μ и ν обозначены соответственно π-мезон, μ-мезон и нейтрино; электрический заряд характеризуется верхним индексом.

Электрон обозначается как e, а e^+ — это позитрон, или антиэлектрон. Фотон обозначен через γ, так как фотоны высокой энергии часто называют γ-лучами[1]).

Известен один распад (это распад нейтрального π-мезона), в котором масса нацело превращается в энергию двух лишенных массы фотонов:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Распад нейтрального π^0-мезона изображен на фиг. 10. Полное исчезновение массы происходит также при столкновении частицы с античастицей, например электрона с позитроном:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Процессы самопроизвольного распада и аннигиляции частиц с античастицами сопровождаются выделением энергии. Масса частиц-продуктов всегда меньше массы исходной частицы или частиц. Разность масс служит источником энергии движения частиц-продуктов.

События, сопровождающиеся возникновением массы, требуют расхода энергии и могут вызываться быстрыми частицами, щедро поставляемыми космическим излучением или ускорителями, созданными руками человека. При столкновении двух протонов могут рождаться новые и (или) более тяжелые частицы. В результате реакции

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$$

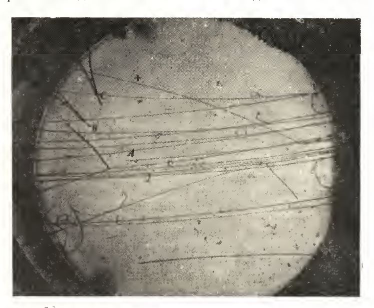
образуются π-мезоны, а в реакции

$$p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + K^+$$

возникают Λ-частицы и K-мезоны. Обе эти реакции обычно происходят, когда один протон (бомбардирующая частица) налетает с большой скоростью на другой протон (мишень). На практике мишенью мог бы

[1]) Частицы, вылетающие с большой скоростью из радиоактивных ядер, первоначально были названы α-, β- и γ-лучами. Это произошло в то время (1898—1900 гг.), когда было установлено наличие излучения трех сортов, но еще до того, как стала ясна природа этих лучей. Позднее (1900—1910 гг.) было обнаружено, что α-частицы — это ядра гелия, т. е. два протона и два нейтрона, связанные воедино; β-частицы оказались электронами, а γ-лучи — фотонами. Тем не менее первоначальные наименования излучений сохранились.

быть сосуд с атомами водорода (ядрами которых являются протоны). Масса рождающихся частиц превосходит массу сталкивающихся частиц. Кинетическая энергия бомбардирующей частицы расходуется на образование дополнительной массы. Родившийся таким



ФИГ. 10. *Рождение и аннигиляция частиц вещества.*

В точке A отрицательный π-мезон, двигавшийся справа, испытывает соударение с протоном, в результате чего образуется нейтральный π-мезон и нейтрон: $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$. Ни одна из образовавшихся нейтральных частиц не оставляет видимого следа. Не дают о себе знать и фотоны, образовавшиеся при распаде π^0-мезона: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Однако в точках B и C оба фотона обнаруживают себя тем, что создают пары электрон — позитрон: $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$. Электроны и позитроны вылетают из поля зрения в направлении налево вверх, оставляя следы, которые обращены к точке первичного соударения, и демонстрируют направление движения фотонов.

образом π-мезон сам может быть использован в качестве бомбардирующей частицы для дальнейшей работы по созданию новой массы, как в реакции

$$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+.$$

Сметя закон сохранения массы, теория относительности уничтожила и представление о том, что в основе

Вселенной лежит прочное и надежное вещество. Современная картина выглядит гораздо более бедной. Жизнь большинства частиц вещества слишком скоротечна, чтобы они могли быть полезны в качестве строительного материала. Даже наиболее стабильные частицы могут разрушаться при столкновении с другими, несущими большую энергию частицами или аннигилировать при встрече с античастицами. Современную картину можно было бы нарисовать следующим образом: благодаря ряду законов сохранения лишь очень небольшому числу частиц в природе посчастливилось быть стабильными. Но и они не избегают тлена, и лишь поскольку в мире, где мы живем, поток бомбардирующих частиц очень слаб, и поскольку в нашем уголке Вселенной много частиц и очень мало античастиц, стабильные частицы смогли образовать прочный материальный мир.

Волны и частицы

В микромире волны и частицы не просто тесно связаны, а представляют собой одно и то же, или, более точно, различные аспекты одного и того же. Этот замечательный факт впервые был отмечен в созданной в 1905 г. Эйнштейном теории фотона, а в полной мере был оценен спустя двадцать лет после работ де-Бройля, Шредингера и других создателей квантовой механики. Теперь, с нашей точки зрения, волновая природа вещества проливает свет на размеры атома, принцип неопределенности (о нем рассказано ниже) и роль вероятности в природе; кроме того, она ставит препоны попыткам изучить внутреннее строение элементарных частиц.

Понятие частицы (корпускулы), как бы мала не была эта частица, усваивается весьма просто. Можно представить себе мяч и вообразить, что он уменьшился до размеров элементарной частицы, скажем до 10^{-13} *см*. В нашем воображении это крошечный сгусток вещества шарообразной формы. У него есть масса, расположен он в определенной точке пространства и может перемещаться с места на место с измеримой скоростью. Чтобы привести частицу в движение,

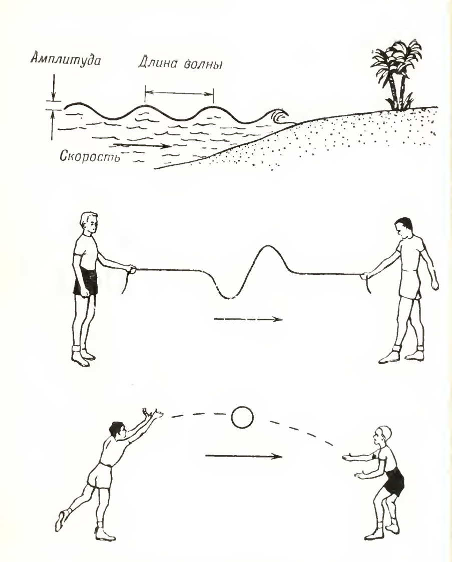
необходима энергия, а останавливаясь или замедляясь, частица отдает свою энергию. Несколько труднее представить себе частицу, лишенную массы, которая всегда проносится со скоростью света. Такие частицы обладают рядом удивительных особенностей; мы посвятим главу пятую фотону и нейтрино, а здесь остановимся на обычных частицах вещества, с помощью которых мы намерены проиллюстрировать корпускулярно-волновой дуализм.

Понятие волны несколько более туманно, нежели понятие частицы, однако и оно ни в коей мере не выходит за рамки обычного. Каждый видел волны на воде и слышал, конечно, звуковые волны. В детстве почти все «экспериментируют» с распространением волны, дергая за один конец натянутой веревки или садового шланга и наблюдая бегущую по ним волну. На первый взгляд кажется, что волна во всем отличается от частицы. Частица находится в определенном месте, тогда как волна распределена по области пространства без четко выраженных границ. О волне нельзя сказать, что она находится именно здесь или именно там. Трудно также представить себе массу, связанную с волной. Волна это не «предмет», а, скорее, некоторое размытое возмущение. Короче говоря, у частицы есть масса, она может находиться в определенной точке пространства, и можно представить себе, что частица имеет определенные размеры. Волна лишена массы, обязательно размыта в пространстве и не имеет четко определенных размеров. Более того, величины, используемые для характеристики волны (ее амплитуда, длина волны, частота), кажутся лишенными смысла по отношению к частице. Представьте себе волны, набегающие на отлогий берег. Амплитудой называют высоту гребня волны над средним уровнем воды; длина волны — это расстояние между соседними гребнями; частота — число волн, проходящих ежесекундно через фиксированную точку. (Для волн на поверхности воды это может быть меньше одного колебания в секунду. Частота музыкального тона «ля» соответствует 440 колебаниям в секунду; в случае радиоволн частота может составлять 1 000 000 колебаний в секунду.)

Несмотря на это очевидное различие, квантовая механика успешно соединила представление о волнах и частицах. Чтобы пояснить природу этого слияния, рассмотрим те свойства волн и частиц, которые характерны даже для окружающего нас макромира. Прежде всего и волны, и частицы могут перемещаться с места на место с определенной скоростью. Однако здесь есть также и отличие. Скорость волны обычно почти не зависит от ее длины и амплитуды. К счастью для сидящих на галерке слушателей симфонического концерта звук распространяется почти с одинаковой скоростью независимо от его силы (амплитуды) или высоты тона (частоты). С другой стороны, частицы легко заставить двигаться с различной скоростью в зависимости от их энергии. Наиболее общей точкой соприкосновения является то, что и волны, и частицы могут совершать работу. Они могут переносить энергию с одного места на другое. И волна, и частица могут приобретать энергию, уносить ее и передавать чему-либо еще. Если дети держат концы длинной веревки (фиг. 11), то один из них, дернув за конец, сообщит веревке энергию. Вдоль веревки побежит волна, которая передаст руке второго ребенка импульс. То же количество энергии можно было бы передать и с помощью «частицы», например мяча, который один из ребят бросит другому.

Даже сегодня физики не говорят, что волна *есть* частица. Скорее, они выражают свою мысль следующим образом: волны обладают корпускулярными свойствами, а частицы обладают волновыми свойствами, и обе концепции неразрывно связаны между собой. Подобно тому как грамотный, но слепой человек представляет себе, что́ такое слон, ученые в настоящее время отдают себе отчет в том, что системы, которые мы называем частицами, обнаруживают весьма разнообразные свойства в зависимости от того, как к ним подходить.

Слияние понятий волны и частицы стало возможно только благодаря изменению наших представлений о волнах и частицах. Сближение этих концепций потребовало некоторых уступок обеих сторон. Наше обычное представление о волне связано с наличием колебания чего-либо. Для возникновения волн на поверхности



ФИГ. 11. *Волны и частицы в макромире.*

Набегающие на отмель волны воды характеризуются длиной волны, амплитудой, скоростью и частотой (это не показано). Волна на веревке имеет те же характеристики, но более локализована; она может передавать энергию от одного ребенка другому, подобно тому как это может делать брошенный мяч (или «частица»).

воды нужна сама вода, звуковые волны требуют наличия воздуха, для волн, бегущих по веревке, нужна веревка. Казалось, что свет не требует материального носителя, поскольку он легко распространяется в свободном пространстве. Но, естественно, предполагалось, что распространение световой волны сопровождается колебаниями *некой среды,* и эта среда была названа *эфиром*. Все попытки обнаружить эфир (в основном в конце прошлого века), оказавшиеся абсолютно безуспешными, составляют поучительную главу истории науки. Тем, что наша вера в неподдающийся обнаружению эфир в конечном итоге была сломлена, мы обязаны главным образом Эйнштейну. Световые волны, по мнению Эйнштейна, следует рассматривать не как колебания эфира, а как волнообразное распространение в действительно пустом пространстве некой призрачной субстанции, называемой «полем». Подобный результат можно оценить как весьма сомнительный успех науки. Ну что ж, одна гипотетическая среда — «эфир» заменяется другой гипотетической средой — «полем». А в действительности это был очень важный шаг вперед. С технической стороны поле определено лучше, чем эфир. Понятие поля является количественным, поддающимся определению и измерению, подобно массе, длине или времени; поле удовлетворяет уравнениям точной теории. Кроме этого, изгнание эфира повлекло за собой кардинальный пересмотр наших представлений о Вселенной. Волны сами по себе обрели бытие и стали как бы более вещественными. Они по-прежнему оставались размытыми, и для их описания все так же использовались длина волны, амплитуда и частота, но они уже представляли нечто сами по себе, а не просто наименование, данное колебаниям специальной среды. Дело обстояло так, как если бы ребенок мог передать волну на веревке без самой веревки. Это был, безусловно, огромный шаг в направлении придания волне корпускулярных свойств, свойств свободного сгустка энергии.

Квантовая механика принесла с собой и некоторые необходимые изменения в наших представлениях о частице. Эти изменения в какой-то мере лишили частицу ее индивидуальности и тем самым сблизили ее

с волной. Наиболее существенной особенностью явилась нелокализуемость частиц. Согласно принципу неопределенности, лежащему в сердце квантовой механики, положение частицы никогда не может быть задано абсолютно точно. Поэтому частица теряет свою индивидуальность и становится размытой, подобно волне. Чем больше частица, тем менее существенна эта размытость, и в окружающем нас мире все «частицы» абсолютно локализованы и имеют вполне определенные, резкие границы. В микромире размытость приобретает всеобщее значение. То обстоятельство, что атом водорода в 100 000 раз больше протона, расположенного в центре атома, почти целиком обусловлено нелокализуемостью легковесного электрона, которая не позволяет ему сидеть бок о бок с протоном и вынуждает занимать при движении все пространство.

Мы можем сказать, что частицы нелокализуемы, ибо они обладают волновыми свойствами (такова обычная интерпретация), вместо того чтобы рассматривать наличие волновых свойств у частиц как следствие их нелокализуемости. То, что мы сказали, в действительности не имеет особого значения. Просто несколько удобнее принять за исходное волновую природу частиц и вывести на ее основе новые особенности, характерные для квантовой механики. Основное уравнение, описывающее волновую природу частиц, впервые постулировал Луи де-Бройль в 1924 г. Вскоре после этого оно вошло в последовательно развитую квантовую механику. О том, что фотон представляет собой в известном смысле и волну, и частицу, знали еще с 1905 г. Де-Бройль первый предположил, что волновая природа должна быть характерна для *всех* частиц.

Соотношение де-Бройля можно записать в следующем виде:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Оно выглядит весьма простым, но приводит к следствиям, столь же важным, как и известное уравнение Эйнштейна $E=mc^2$. Прежде всего некоторые определения: λ — длина волны, h — постоянная Планка, p — импульс. Обычное определение импульса таково:

$p=mv$, т. е. произведению массы покоя на скорость. Чем тяжелее частица или чем быстрее она движется, тем больше ее импульс. Товарный вагон, движущийся со скоростью 10 *км/час*, обладает большим импульсом, чем автомашина, движущаяся с той же скоростью, и его соответственно труднее остановить. Автомашина, идущая со скоростью 60 *км/час*, имеет импульс, больший, чем у аналогичной автомашины, идущей со скоростью 10 *км/час*, и ее тоже труднее остановить. Грубо говоря, импульс тела служит мерой того, как долго и как сильно на него надо воздействовать, чтобы сообщить телу его скорость. Даже двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, элементарные частицы не приобретают большого импульса. Их импульс из-за массы частиц остается значительно меньше, скажем, импульса ползущей по полу улитки. Согласно теории относительности, импульс уже не записывается просто как $p=mv$ [1]), однако общий смысл импульса остается прежним. Заметим, в частности, что фотон или нейтрино, не обладая массой покоя, тем не менее имеют импульс.

Импульс p является корпускулярной характеристикой, а длина волны, — очевидно, волновой. Обе характеристики связаны между собой уравнением де-Бройля, причем эта связь осуществляется через посредство постоянной Планка h. Именно благодаря малости постоянной h волновые свойства частиц проявляются только в микромире. Подобно формуле Эйнштейна $E=mc^2$, смысл которой состоит в пропорциональности энергии E массе m (причем коэффициентом пропорциональности служит c^2), смысл соотношения де-Бройля состоит в пропорциональности длины волны λ *обратной* величине импульса $1/p$ (причем коэффициентом пропорциональности служит постоянная Планка h). Это соотношение утверждает, что каждой частице с импульсом p соответствует длина волны λ, даваемая формулой $\lambda=h/p$. Поскольку p стоит в знаменателе, то чем больше p, тем меньше λ. Макроскопическим телам с огромными

[1]) Релятивистская формула для частицы с массой покоя m имеет вид $p=mv/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$, где c — скорость света. Для частицы, лишенной массы покоя, $p=E/c$, где E — энергия частицы.

импульсами соответствуют столь малые длины волн, что их волновые свойства совершенно незаметны. Человеку, идущему со скоростью 5 *км/час*, соответствует длина волны меньше 10^{-33} *см*. Попытка двигаться медленнее, чтобы увеличить длину волны, не принесет большого успеха. Если бы человек передвигался со скоростью 1 *см* в столетие, то его длина волны оставалась бы меньше 10^{-21} *см*, т. е. все еще в 100 млн. раз меньше размеров элементарной частицы. С другой стороны, электрону, движущемуся в атоме водорода со скоростью около $3 \cdot 10^8$ *см/сек*, соответствует длина волны $2 \cdot 10^{-8}$ *см*, т. е. как раз примерно поперечник атома. Мы еще вернемся к вопросу о длине волны частиц и способности их к локализации.

Одно дело познакомиться с тем или иным выражением, а другое дело оценить и понять его. Любой человек может в несколько мгновений запомнить соотношения $E=mc^2$ и $\lambda=h/p$, но что в действительности они означают? Почему они столь важны? Поучительно сравнить эти соотношения, чтобы в дополнение к знакомству с ними «почувствовать» их смысл. Первое представляет собой фундаментальное соотношение теории относительности, второе — фундаментальное соотношение квантовой механики. Первое содержит мировую постоянную c — скорость света, которая лежит в основе теории относительности (напомним, что c есть скорость света в пустоте, и специфически релятивистские явления проявляются при скоростях, близких к скорости света). Второе соотношение содержит мировую постоянную h — постоянную Планка, которая лежит в основе квантовой механики (напомним, что спины элементарных частиц, например, измеряются в единицах $h/2\pi$). В соотношении Эйнштейна E и m называются переменными, так как в отличие от c они могут принимать различные значения для разных частиц. Аналогично, λ и p являются переменными в соотношении де-Бройля. Для возникновения новых представлений наиболее существенно то, что оба соотношения символизируют некий синтез. Между массой и энергией, которые ранее считались разными и несвязанными величинами, соотношение Эйнштейна установило простую и пропорциональную связь.

Соотношение де-Бройля породило аналогичный синтез, казалось бы, несвязанных представлений о длине волны и импульсе частицы. Кроме того, большое значение имеет расположение переменных в соотношении. Величина m в соотношении Эйнштейна находится в числителе. Это означает, что бо́льшая масса обладает большей энергией или, наоборот, для создания большей массы требуется бо́льшая энергия. Тот факт, что в соотношении де-Бройля p стоит в знаменателе, означает, что чем больше импульс частицы, тем короче длина соответствующей ей волны. Чем легче частица и чем медленнее она движется, тем больше длина ее волны и тем более очевидны ее волновые свойства.

Имеет значение и величина постоянных: c «велико», а h «мало» по сравнению с «обычными» величинами окружающего нас макромира. Если мыслить привычными масштабами, то можно сказать, что небольшой массе соответствует огромная энергия, так как в соотношении Эйнштейна m умножается на «большое» число c^2. То, что мы считаем огромным выделением энергии, например взрыв атомной бомбы, обусловлено превращением в энергию небольшой массы, примерно 1 *г*; так, скажем, было в случае бомбы, сброшенной на Хиросиму. В наших масштабах величина h очень мала. Поэтому «обычный» импульс соответствует бесконечно малой длине волны. В величине этих констант лежит причина запоздавшего выхода на сцену теории относительности и квантовой механики. В силу того что основные константы этих теорий столь далеки от обычного человеческого опыта, люди смогли приступить к созданию новых теорий лишь после того, как экспериментальная методика расширила область наблюдений далеко за пределы обычных человеческих возможностей.

Первым доказательством наличия корпускулярных свойств волн явилось то обстоятельство, что световые волны поглощаются лишь дискретными порциями энергии (Эйнштейн, 1905 г.). С тех пор было найдено немало доказательств (в том числе прямых, но в большинстве косвенных), подтверждающих волновую природу частиц. Распад нейтрального π-мезона (см. фиг. 10) служит примером специфического характера

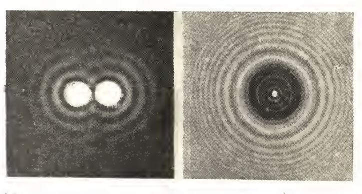
связи частиц и волн. Частица вещества, π-мезон, нацело превращается в световые волны (два фотона), которые в свою очередь, исчезая, порождают частицы.

Наиболее убедительным и прямым доказательством наличия волн служат явления дифракции и интерференции. Дифракция состоит в слабом преломлении и искажении волны, которым сопровождается прохождение волны вблизи препятствия. С другой стороны, частица, проходя вблизи препятствия, просто не должна почувствовать его присутствия. При встрече двух волн может происходить интерференция, т. е. волны могут гасить друг друга, если гребень одной волны будет приходиться на впадину другой. Подобная интерференция представляет собой чисто волновое явление, которое немыслимо в случае двух пучков частиц. Наличие дифракционных и интерференционных явлений можно рассматривать как убедительный аргумент в пользу волн — и первое, что может прийти в голову, это вывод о существовании волн микромира. В действительности именно изучение упомянутых явлений в начале XIX века послужило надежным подтверждением волновой природы света. На фиг. 12 изображены картины дифракции и интерференции света.

Вслед за гипотезой де-Бройля о наличии волновых свойств у всех частиц Клинтон Девиссон и Лестер Джермер обнаружили в 1927 г. на электронных пучках волновые явления дифракции и интерференции. Позднее оказалось, что лучше всего явления дифракции и интерференции демонстрируются в опытах с нейтронами. Книга Доналда Юза, одного из пионеров исследования волновых свойств частиц, названа просто «Нейтронная оптика»[1]. Этот заголовок служит красноречивым доказательством происходящего в физике синтеза волн и частиц. Важной особенностью нейтрона является отсутствие у него электрического заряда. Наиболее заметно волновые эффекты происходят при максимальной длине волны, которая в свою очередь благодаря соотношению де-Бройля соответ-

[1]) Имеется перевод: Д. Юз, Нейтронная оптика, ИЛ, 1955.— *Прим. перев.*

ствует минимальному импульсу. Электроны, движущиеся с малым импульсом, легко возмущаются встречающимися электрическими полями любой величины. Поэтому такие электроны не могут проникать в твердое вещество. Что же касается нейтронов, то они могут замедляться до скоростей 10^5 *см/сек* или меньше,



ФИГ. 12. *Интерференция и дифракция света.*

Картина слева создана светом от двух источников, прошедшим через одно и то же круглое отверстие. В тех местах, где волны совпадают (впадина со впадиной и гребень с гребнем), они усиливают друг друга, создавая светлые полосы. Там, где гребень одной волны совпадает со впадиной другой, они «интерферируют» и гасят друг друга, в результате чего возникают темные полосы. Справа изображена тень, оставленная круглым диском. Волны, проходящие у края диска, дифрагируют, и граница тени становится размытой. Волны отклоняются со всех сторон к центру тени, усиливают друг друга и создают яркое пятно.

не подвергаясь возмущающему воздействию. Такие медленные нейтроны с относительно большой длиной волны легко проходят через тонкие слои твердого вещества. Для характеристики соотношения между длиной волны и импульсом отметим, что нейтрон, движущийся со скоростью $4 \cdot 10^5$ *см/сек* (космонавт на орбите движется примерно вдвое быстрее), имеет длину волны 1 Å (10^{-8} *см*).

Ряд удивительных особенностей мира элементарных частиц находит свое объяснение в волновой природе частиц. Если говорить об этом мире, то, вероятно, наиболее существенной волновой особенностью является нелокализуемость. О волне нельзя сказать, что она находится точно в этой точке или точно в той

точке. В лучшем случае известно, что она находится в этой области или в той области. Волна может быть локализована лишь *приближенно,* причем минимальное расстояние, в пределах которого имеет смысл говорить о положении волны, равно ее собственной длине волны. Грубо говоря, волна, чтобы вообще иметь право называться таковой, должна пройти хотя бы через один период колебаний и, таким образом, должна занять пространство, по крайней мере равное ее длине волны. Вообразим, к примеру, длинную веревку, концу которой сообщили отдельный импульс. По веревке будет распространяться волна в форме отдельного всплеска; положение всплеска характеризует положение волны. Однако волна занимает целую область, а не сосредоточена в точке, причем размер области равен длине всплеска, примерно совпадающей с длиной волны возмущения.

В микромире нелокализуемость проявляется просто в том, что положение частицы даже в принципе можно фиксировать лишь с точностью до размеров длины волны частицы. Волновые свойства вещества вносят существенную расплывчатость в саму природу; длина волны частицы определяет ту область, в пределах которой о местоположении частицы ничего неизвестно и не может быть известно. Кто-нибудь может подумать, что это должно позволить нам совсем отказаться от частиц и считать, что существуют только волны. Однако сделать этого нельзя, поскольку корпускулярные свойства проявляются в процессах рождения и аннигиляции. Процессы рождения и гибели частиц корпускулярны, поскольку они происходят мгновенно в определенной точке пространства и времени; в промежутке между рождением и гибелью жизнь частицы оказывается «волновой»; частица характеризуется длиной волны, она как бы размазана по некоторой области пространства.

Применим эти представления к размерам атома водорода. Этот атом состоит из одного протона — тяжелой частицы, которую на мгновение мы можем представить закрепленной в определенной точке, и электрона — легкой частицы, движущейся вокруг протона. Между частицами действует сила электрического притяжения. Согласно «классическим» предста-

влениям, электрон должен испускать световые волны, постепенно теряя энергию и приближаясь по спирали к протону. В результате размер атома в конце концов уменьшился бы до размеров протона 10^{-13} *см*. Но волновая природа электрона препятствует этому сжатию. Если электрон приближается по спирали к протону, то он ограничивается все меньшей и меньшей областью пространства. Это означает, что соответственное уменьшение должна испытывать и его длина волны. Согласно соотношению де-Бройля, чем меньше длина волны, тем больше импульс и соответственно энергия движения (кинетическая энергия). В этом загадка природы. Смысл волновой природы электрона состоит в том, что его можно удержать в небольшой области пространства только в том случае, если он имеет большую кинетическую энергию. Начиная с определенного предела, силы электрического притяжения оказывается недостаточно для дальнейшего увеличения энергии, и сближение электрона с ядром прекращается. Это же можно выразить и несколько по-иному: под влиянием электрического притяжения у электрона «возникает желание» быть поближе к протону. Но чтобы обладать по возможности малой энергией, электрону «хотелось бы» иметь очень большую длину волны и расплыться по большой области пространства. Обе эти противоположные тенденции (протон притягивает его к себе, а волновая природа гонит прочь) уравновешивают друг друга на определенном расстоянии, которое оказалось равным примерно 10^{-8} *см* (размер атома). Размеры всех более тяжелых атомов определяются аналогичным образом; все они в поперечнике составляют примерно 10^{-8} *см*. Случайно аналогичные аргументы были использованы для изгнания электронов из ядер. Если бы электрон оказался заточённым в крохотном ядре, то он обладал бы слишком большой энергией и его нельзя было бы удержать там. Таким образом, вылетающий в процессе β-распада из ядра электрон должен рождаться в момент распада, а не выходить из хранилища, уже содержавшего электроны.

Волновая природа частиц тесно связана с той фундаментальной ролью, которую вероятность играет в природе. Эту связь нелегко понять во всех деталях,

но атом водорода снова послужит нам для иллюстрации общей идеи. Нельзя считать, что электрон находится в какой-то определенной точке атома, так как его следует представить в виде волны. Электрон размыт по области, составляющей примерно одну длину волны. И все же мы можем поставить эксперимент, демонстрирующий корпускулярную природу электрона. Если быстрый позитрон налетает на атом, он может столкнуться с электроном; если это случается, обе частицы исчезают и возникает пара фотонов. В принципе эти фотоны могли бы указать на то место внутри атома, где находится электрон в момент аннигиляции. (Такой эксперимент невозможно провести на практике, но он вполне мыслим в принципе.)

Ключом к решению кажущегося парадокса электрон — волна и электрон — частица является понятие вероятности. Электронная волна до аннигиляции должна быть интерпретирована как распределение вероятности. Там, где волна велика, есть большая вероятность найти электрон. Там, где волна мала, вероятность найти электрон ничтожна. Если один и тот же опыт с позитроном повторить на нескольких атомах водорода, причем все они будут обладать *в точности* одинаковыми свойствами в отношении известных нам характеристик, то результаты различных опытов не будут тождественны. Иногда электрон окажется в одной части атома, иногда — в другой, подчас близко к ядру, а подчас вдали от него. Но практически всегда электрон будет находиться в пределах расстояния 10^{-8} *см* от протона, т. е. в области, где электронная волна велика. В общем случае для любой частицы «размытость», обусловленная волновой природой, характеризует распределение вероятности для этой частицы.

Одно из наиболее глубоких представлений о природе, вскрытых квантовой механикой, связано с принципом неопределенности Гейзенберга. Это общий принцип, встречающийся в многочисленных видах. Нам будет достаточно рассмотреть один из них, который можно записать как

$$(\Delta x)(\Delta p) = \hbar.$$

Справа стоит вездесущая постоянная Планка (в данном случае деленная на 2π), входящая во все уравнения квантовой механики. Импульс снова обозначен через p, а координата (расстояние) — через x. Символ Δ обозначает «неопределенность в величине», Δx — неопределенность координаты, Δp — неопределенность импульса. Произведение этих двух неопределенностей равно постоянной $\hbar$. В масштабах макромира величина $\hbar$ крайне мала, и в окружающем нас мире Δx и Δp столь близки к нулю, что с практической точки зрения в координате и импульсе больших предметов нет какой бы то ни было неопределенности. Если мы захотим задать положение человека с точностью до размеров атома, то его скорость в принципе будет определяться с точностью примерно 10^{-24} *см/сек*. Нет нужды говорить, что ошибки измерений проявляются еще задолго до того, как начинают играть какую-либо роль фундаментальные ограничения точности, налагаемые принципом неопределенности. Однако в мире элементарных частиц это не так. Массы и расстояния оказываются здесь столь малыми, что принцип неопределенности имеет кардинальное значение. Например, электрон, чтобы быть локализованным в пределах атома (это эквивалентно неопределенности его координаты 10^{-8} *см*), должен иметь неопределенность скорости около 10^{8} *см/сек*.

При обсуждении принципа неопределенности самого по себе, вне квантовой механики, ему часто приписываются значение и смысл, по-видимому, необоснованные. Этот принцип имеет очевидные философские следствия и особенно популярен среди тех, кто склонен нападать на науку. Эти нападки вызваны следующим: принцип неопределенности показывает, что природа не позволяет даже самым скрупулезным ученым проводить измерения с той точностью, с какой они хотели бы это сделать. Тут можно было бы возразить, что природа охраняет свои сокровенные тайны и позволяет человеку продвигаться в его поисках лишь до определенного предела. На самом же деле принцип неопределенности есть фундаментальный факт, отражающий в сжатом виде важный момент физического содержания квантовой механики. Тем не менее его можно рассматривать как еще один аспект

волновой природы вещества, и в этом случае он кажется гораздо менее загадочным.

Допустим, что мы вернулись к рассмотрению звуковых волн, с которыми знакомы лучше, чем с волнами частиц, и обратимся к системе органных труб. Как правило, на нижнем конце открытой трубы возникает пучность, а на верхнем конце — узел, так что в трубе заключается полволны. В больших трубах возникают низкие тоны с большой длиной волны, а в коротких — высокие тоны с малой длиной волны.

Можно спросить: если воздух в трубе приведен в колебания, то где в трубе находится звуковая волна? Конечно, везде; точнее задать ее положение нельзя. Можно сказать, что длина трубы характеризует «неопределенность положения» звуковой волны. Высокий тон локализован в маленькой трубе довольно точно, низкий тон локализован в длинной трубе значительно менее точно. Поскольку длина трубы равна половине длины волны, то наш вывод можно выразить с помощью простого соотношения

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2},$$

т. е. неопределенность положения звуковой волны равна половине ее длины волны. Множитель $^1/_2$ появляется здесь потому, что мы рассмотрели особый случай открытой органной трубы. В каком-либо другом примере мы получили бы иной множитель, однако этот множитель всегда будет близок к единице. В качестве более общего приближения мы могли бы написать

$$\Delta x = \lambda.$$

Но это не что иное, как математическое выражение нелокализуемости, которое мы уже использовали при обсуждении размеров атома водорода. Любая волна должна заполнять область пространства, по крайней мере превышающую ее длину волны.

Вернемся теперь к волнам частиц и займемся немного выкладками. Если Δx (неопределенность положения волны) равна λ (длине волны), а, согласно

соотношению де-Бройля, $\lambda = h/p$, то Δx также равно h/p, т. е.

$$\Delta x = \frac{h}{p}.$$

Это соотношение можно переписать в виде

$$(\Delta x)\, p = h,$$

или, выразив это же словами: произведение неопределенности положения частицы-волны и импульса частицы равно постоянной Планка h. В действительности это соотношение не вполне правильно, и p следует заменить на $2\pi\Delta p$, чтобы получить

$$2\pi (\Delta x)(\Delta p) = h, \quad \text{или} \quad (\Delta x)(\Delta p) = \hbar,$$

т. е. в точности то выражение, которое мы первоначально писали для принципа неопределенности. Замена p на $2\pi\Delta p$ носит чисто формальный характер [1]) и не меняет общей картины. Существенно то, что принцип неопределенности Гейзенберга является следствием волновой природы частиц. Он не имеет более глубокого смысла и говорит не больше и не меньше, чем соотношение де-Бройля, характеризующее длину волны материальных частиц. По существу, неопределенность измерения обусловлена нелокализуемостью волн.

Воистину принцип неопределенности делает трудной жизнь физиков, изучающих элементарные частицы, и дорого обходится правительствам разных стран. Источником наших знаний о микромире являются главным образом результаты опытов по рассеянию, в которых бомбардирующая частица направляется на ядро-мишень. В результате частицы

[1]) В квантовой механике точно определенному импульсу соответствует волна с большим числом периодов колебаний. Для получения по возможности локализованной волны и сохранения ее на протяжении одного или нескольких периодов колебания необходимо взять набор различных импульсов, т. е. допустить неопределенность импульса.

отклоняются или рассеиваются и испускаются вновь, чтобы затем оказаться зарегистрированными счетчиками Гейгера, пузырьковыми камерами или иными детекторами. При таких соударениях могут происходить и более сложные события. Скажем, могут рождаться, а затем улетать новые частицы. Рассеяние вошло в обиход как понятие общего процесса, в котором участвуют две или большее число частиц и которые после мимолетного взаимодействия разлетаются в разные стороны. Детально изучая частицы, возникающие в результате столкновений, т. е. определяя, что это за частицы, с какой скоростью и в каком направлении они летят, можно установить, что произошло в момент взаимодействия на крошечных расстояниях, до которых сблизились частицы. И важное ограничение точности, с которым при этом можно столкнуться, обусловлено волновыми свойствами частиц.

Допустим, что мы ставим своей целью изучение судов в гавани по характеру волн, прошедших мимо них Стоящий на якоре большой корабль существенно повлияет на картину набегающих на него волн. За кораблем останется «тень» спокойной воды, а волны, огибающие корабль, создадут характерную дифракционную картину. Изучение волн, распространяющихся в различных направлениях, позволяет получить довольно точные сведения о форме и размерах судна. Но если те же волны набегают на торчащую из воды сваю, то они почти не исказятся и в лучшем случае смогут указать на наличие какого-то небольшого препятствия, не уточняя ни его размеров, ни формы. Однако разглядеть сваю и тем самым проанализировать ее с помощью световых волн нетрудно. Здесь имеется одно очень важное обстоятельство. Изучение волн — это надежный метод анализа лишь в том случае, когда предметы превышают длину волны. С помощью волн нельзя обнаружить наличие каких-либо деталей, меньших, чем их длина волны. Поэтому, если нужно изучить при помощи волн какие-то предметы, длину волны следует выбрать меньше размеров этих предметов.

Размеры предметов, или, лучше сказать, областей пространства, которые изучаются физиками, состав-

ляют в настоящее время 10^{-13} *см* или меньше. Возможность изучать еще меньшие расстояния была бы встречена физиками с воодушевлением. Поэтому они стремятся использовать в своих опытах по рассеянию в качестве налетающих частиц по возможности частицы с наименьшей длиной волны. Возникающая здесь трудность обусловлена тем, что, согласно соотношению де-Бройля, чем меньше длина волны, тем больше должен быть импульс. Чтобы прощупывать все меньшие и меньшие расстояния, физики должны использовать частицы все с более и более высокой энергией и соответственно импульсом. Для этого приходится сооружать большие ускорители частиц; в последние годы эти машины приобрели гигантские размеры, и для их создания затрачиваются огромные средства.

Строение протона впервые было изучено в основном в опытах, выполненных в Стэнфордском университете Робертом Хофштадтером. Во время эксперимента стэнфордский линейный ускоритель разгонял электроны до энергий 600 *Мэв*; при этой энергии длина волны электрона составляет примерно $2 \cdot 10^{-13}$ *см*. Напомним для сравнения, что электрон в атоме водорода имеет длину волны $2 \cdot 10^{-8}$ *см*, т. е. в 100 тысяч раз большую. Самые большие ускорители, работающие в настоящее время в Брукхэйвене и Женеве, ускоряют протоны до энергии примерно 30 *Гэв*, при которой длина волны протонов равна $4 \cdot 10^{-15}$ *см*. В будущем запланировано сооружение еще более грандиозных ускорителей, т. е. получение еще меньших длин волн. Однако перед людьми возникает серьезное затруднение, которое состоит в том, что загадки элементарных частиц должны быть решены (если люди вообще намерены это сделать) при длинах волн ненамного короче 10^{-15} *см*. Чтобы спуститься до расстояний $4 \cdot 10^{-15}$ *см*, была сооружена Брукхэйвенская машина (см. фиг. 4), имеющая в окружности около 0,8 *км* и потребовавшая затрат 32 млн. долларов с ежегодным эксплуатационным бюджетом в несколько миллионов долларов. В этом смысле принцип неопределенности явно ставит рогатки попыткам человека проникнуть в глубины строения вещества.

Еще некоторые великие идеи

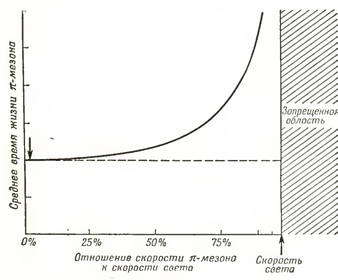
Наука XX века вызвала к жизни ряд блестящих идей, блестящих потому, что они противоречат здравому смыслу, порожденному повседневными наблюдениями. Избранные для обсуждения в этой главе три вопроса, далеко не единственные, хотя они, безусловно, принадлежат к числу наиболее важных проблем. Мы уже упоминали несколько иных аспектов, которые заслуживают наименования «великих идей», хотя так они и не назывались. Один из них заключается в эквивалентности массы и энергии, другой состоит в том, что скорость света является фундаментальной константой, естественным пределом скорости. Обсуждая понятие спина, мы столкнулись с одним из наиболее важных представлений квантовой механики. Это общее представление о квантовании или дискретности явлений природы. В мире, доступном нашим органам чувств, все физические величины *кажутся* непрерывными. От железной трубы можно, по-видимому, отрезать кусок любой длины, а не точно 6, 8 или 10 метров. Детский волчок, замедляясь, плавно теряет скорость вращения и постепенно останавливается. Но более детальное рассмотрение напоминает нам, что труба состоит из отдельных атомов, а момент количества движения волчка изменяется скачками на целое кратное фундаментальной константы $\hbar$. Незримая крупинка железа могла бы иметь в длину шесть атомов или восемь, но никогда шесть с половиной. Спин замедляющегося волчка совершает «квантовые скачки» величиной $\hbar$, или $2\hbar$, или $3\hbar$, но скачки не бывают промежуточной величины. И лишь из-за того, что приращение, отвечающее соседним значениям квантовой величины, в наших масштабах исчезающе мало, плавное и непрерывное изменение кажется нам характерным для окружающего макромира.

Не все случаи квантования в природе, однако, понятны — квантовая механика дала объяснение дискретности энергии и спина. Но почему масса и заряд принимают лишь определенные значения, пока остается загадкой и звучит как вызов ученым.

В качестве последней из «великих идей» мы упомянем об относительности времени. В некотором отношении эта самая блестящая из всех идей, так как она приводит к ряду кажущихся парадоксов, абсолютно противоречащих здравому смыслу. Здравый смысл и вся наша повседневная жизнь основаны на представлении, что существует определенное и четкое понятие времени, относительно которого у всех людей имеется единое мнение. Согласно теории относительности, это совсем не так. Масштаб времени оказался совсем ненадежной вещью, зависящей от состояния движения. Мое время и ваше время не одинаковы, если мы движемся друг относительно друга. Однако это различие не будет заметным, пока наша относительная скорость далека от скорости света.

Обстоятельное обсуждение относительности времени увело бы нас слишком далеко от основного предмета этой книги, и мы упомянем лишь о его влиянии на время жизни элементарных частиц. Экспериментально установлено, что время жизни π-мезона (и всех прочих частиц) возрастает с увеличением скорости частиц. Поскольку распадом управляет вероятностный закон, для определения среднего времени жизни при каждой скорости необходимо исследовать в каждом случае большое число π-мезонов. Результаты таких исследований будут иметь вид графика, изображенного на фиг. 13. При не очень больших скоростях среднее время жизни остается неизменным и является вполне определенной величиной для π-мезона. Его величина изображается горизонтальным участком кривой, который соответствует скоростям много меньше скорости света. По мере приближения к скорости света среднее время жизни заметно возрастает. Движущийся со скоростью 80% от скорости света π-мезон в среднем живет в 1,67 раза дольше медленного π-мезона. При скорости, составляющей 99% от скорости света, время жизни удлиняется в 7 раз, и столь быстрые π-мезоны живут в 7 раз дольше своих медленных собратьев. Интерпретация этого явления состоит в том, что собственное время жизни в действительности не меняется, а для частиц, движущихся с большой скоростью, течение времени замедляется. С его собственной точки зрения, быстрый

π-мезон живет всегда одно и то же отведенное ему время, а по мнению наблюдателя, находящегося в лаборатории, проходит большее время. Собственные часы быстрого π-мезона замедляют свой ход и отсчитывают к этому моменту 10^{-8} *сек*, а часы в лаборатории проворно отсчитывают $7 \cdot 10^{-8}$ *сек*. Это удлинение времени было смело предсказано в 1905 г., т. е.



ФИГ. 13. *Замедление хода времени.*

С увеличением скорости π-мезона время его жизни возрастает. Стрелкой в левой части рисунка обозначена скорость, соответствующая обращению вокруг Земли за 5 *сек*. Эта скорость в 1000 раз больше скорости космонавта на корабле-спутнике.

за несколько десятилетий до того, как появилась возможность его непосредственно измерить. Вероятно, следует добавить, что движение с большой скоростью не может служить источником вечной молодости. Поскольку у путешественника, движущегося с большой скоростью, замедляются и скорость течения времени, и ритм жизни, то он не сможет воспользоваться своей долговечностью. Течение его жизни покажется путешественнику вполне нормальным.

Очень может быть, что необычные представления современной физики — это лишь предвестники еще более странных представлений будущего. Непосредственное восприятие человека ограничено, и не следует удивляться тому, что и идеи, и представления о мире, возникающие в результате расширения этих границ методами наблюдения и новыми теориями, будут противоречить данным, которые поставляют человеку его органы чувств. Подобно тому как летчик, обучающийся управлению самолетом, должен научиться доверять ему, забыв о своих чувствах, ученые (а в конце концов и простые люди) должны научиться мыслить по-новому и отбросить предвзятые мнения, основанные на прежнем опыте. История развития не оставляет сомнения в том, что способность человека воспринимать новые и необычные представления и, что еще более важно, создавать такие представления позволит ему продвинуться очень далеко на пути к истинному знанию.

ГЛАВА
ЧЕТВЕРТАЯ

Законы сохранения

На протяжении нескольких последних столетий законы сохранения постепенно, незаметно, но неуклонно превратились из второстепенных, хотя и любопытных, разделов физики в ее центральную часть. То немногое, что нам удалось узнать о взаимодействиях и превращениях элементарных частиц, установлено в значительной мере благодаря определенным законам сохранения, управляющим поведением этих частиц.

Закон сохранения утверждает постоянство чего-либо в природе. Если комната заполнена людьми, пришедшими, скажем, на вечеринку, и состав компании не меняется, т. е. никто не приходит и не уходит, то можно утверждать, что существует закон сохранения числа людей, число их остается неизменным. Но такой закон не представлял бы особого интереса. Теперь допустим, что закон сохраняет свою силу даже тогда, когда гости и приходят, и уходят. В этом случае закон уже будет иметь большую ценность, поскольку он подразумевает, что число гостей, появляющихся в еди-

ницу времени, в точности равно числу гостей, покидающих комнату в единицу времени. Несмотря на происходящие перемены, что-то остается постоянным. Важные законы сохранения в природе носят именно такой характер, они утверждают постоянство чего-либо в процессе изменения. Не удивительно, что ученые в своих поисках простых представлений с особым энтузиазмом обращаются к законам сохранения, ибо что же может быть проще величины, которая остается совершенно неизменной даже при сложных превращениях! В мире элементарных частиц строго постоянным остаётся, например, полный электрический заряд независимо от количества рождающихся и исчезающих частиц.

Законы классической физики чаще всего имеют вид законов изменения, а не законов постоянства. Так, законы механики Ньютона описывают реакцию движения тел на силы, действующие на эти тела. Электромагнитные уравнения Максвелла связывают скорости изменения электрического и магнитного полей в пространстве и времени. На ранней стадии развития основополагающих наук главное внимание, естественно, уделялось открытию законов, которые успешно описывали бы происходящие в природе изменения. Иными словами, в этом состояла сущность «классического» взгляда на законы природы. Человек способен придумать бесчисленное количество возможных законов, с помощью которых можно было бы описать определенное явление. Однако природа отдает предпочтение лишь одному из них, и задача науки — найти этот закон. Успешно справившись с задачей отыскания законов изменения, человек может найти с их помощью некоторые законы сохранения, такие, как закон сохранения энергии в механике. Эти законы представляют собой, по-видимому, особенно интересные и полезные следствия теории. Однако сами по себе они не могут считаться фундаментальными положениями теории.

Постепенно законы сохранения заняли главенствующее положение среди законов природы. И произошло это не только благодаря их простоте (хотя простота сыграла не последнюю роль), но имелись еще две другие причины. Первая — это наличие связи

между законами сохранения и принципами инвариантности и симметрии в природе, один из наиболее изящных аспектов современной науки. Смысл этой связи будет обсуждаться в конце настоящей главы. Вторая причина, которую мы хотим упомянуть здесь, по-видимому, лучше всего может быть охарактеризована как новый взгляд на мир, где законы сохранения, как и следовало ожидать, выступают в качестве фундаментальных законов природы. В основе этого нового взгляда лежит представление о господстве порядка над хаосом — порядка, который провозглашается законами сохранения и объемлет хаос непрерывного уничтожения и возрождения происходящих в микромире явлений. Из современных исследований элементарных частиц вытекает, что единственным ограничением хаоса событий в мире сверхмалого являются запреты, налагаемые законами сохранения. Все, что *может* происходить без нарушения закона сохранения, *действительно* происходит.

Эта новая точка зрения, своего рода демократия в природе (свобода в рамках закона), характеризует кардинальное изменение представлений людей о законах природы. Согласно старым представлениям, фундаментальные законы природы должны быть законами *дозволения*. Они определяют, *что может* (и должно) происходить в природе. Согласно новой точке зрения, наиболее фундаментальные законы носят характер *запретов*. Они определяют, что *не может* происходить в природе. Так, законы сохранения действительно являются законами запрета. Они запрещают любое явление, при котором изменялась бы сохраняющаяся величина, в противном случае разрешено любое событие. Рассмотрим, к примеру, образование π-мезонов при соударении протона с протоном

$$p+p\rightarrow p+p+\pi+\pi+\pi+\ \ldots .$$

Если бы законы дозволения были в силе, то можно было бы ожидать, что при соударении, происходящем определенным образом, число и тип образующихся π-мезонов окажутся точно определенными. Законы сохранения содержат меньше ограничений. Закон сохранения энергии ограничивает число π-мезо-

нов, которые могут возникнуть, поскольку на массу каждого из них расходуется некоторая часть энергии протонов. Этот закон мог бы, например, указать, что возможно образование не более шести π-мезонов. В реальном столкновении может не оказаться ни одного π-мезона или родиться один или любое их число до шести. Закон сохранения заряда утверждает, что полный заряд π-мезонов должен быть равен нулю, но при этом не накладывает ограничений на заряд какого-то отдельного π-мезона. Этот мезон может быть положительным, отрицательным или нейтральным.

Чтобы более четко представить себе различие между законами дозволения и запрета, вернемся к устроенной вечеринке. Закон изменения (т. е. закон дозволения) мог бы описывать зависимость от времени числа гостей, приходящих и уходящих в единицу времени. В простейшем варианте он утверждал бы, что ежеминутно в 6.00 приходило 3 гостя, в 6.15 — два гостя и т. д. Этот закон, не меняя при этом его природы как закона дозволения, можно было бы описать следующей формулой, характеризующей число гостей, приходящих в единицу времени:

$$R = \frac{A}{\pi D} \frac{1}{1 + \left(T - 5 - 2\frac{A}{D}\right)^2},$$

где R — число прибывающих ежеминутно гостей, A — годовой доход хозяина дома в тысячах долларов, D — расстояние от ближайшей станции метрополитена в милях, T — время дня. По своему характеру такой закон напоминает законы классической физики. Он охватывает большое число случаев, но в каждом из этих случаев точно предсказывает то, что должно произойти.

Законы сохранения более просты и содержат меньше ограничений. Допустим, что между 7 и 10 часами число гостей на всех вечеринках одинаковое. Это очень важное утверждение, носящее общий характер и привлекающее своей широкой применимостью и простотой. Если бы оно оказалось справедливым, то его следовало бы рассматривать как поразительно точный и чрезвычайно глубокий закон поведения людей. Но он содержит значительно меньшую

информацию, нежели приведенная выше формула для R. Закон сохранения позволяет гостям прибывать в любом числе при условии, что столько же гостей уходит. Чтобы еще немного продолжить аналогию с естественными законами, следует сказать, что, согласно старой точке зрения, поскольку прием гостей — дело обычное, мы пытаемся найти простое выражение законов, управляющих потоком гостей. Исходя из новых представлений, мы надеемся, что поток приходящих и уходящих гостей будет ограничен лишь определенными законами сохранения. Любые события, не возбраняемые законами сохранения, рано или поздно на какой-то вечеринке действительно произойдут.

Должно быть ясно, что существует тесная связь между таким взглядом на природу и той фундаментальной ролью, которую в природе играет вероятность. Если различные возможные результаты эксперимента не запрещаются законами сохранения, как в случае упоминавшегося выше соударения протона с протоном, то эти возможности будут действительно осуществляться, причем каждая с некой определенной вероятностью. Уже сам факт, что мы можем употреблять слово «хаос» для характеристики процессов рождения и аннигиляции, непрерывно происходящих с частицами, покоится на существовании вероятностных законов. В лучшем случае, *по-видимому*, но нигде *наверняка* — это то, что мы можем утверждать относительно этих нескончаемых превращений, происходящих в мире элементарных частиц.

Не вытекает ли сам по себе вероятностный характер законов из законов сохранения? Мы не знаем пока ответа на этот вопрос, однако тенденция развития в настоящее время такова, что и автор, и многие физики готовы держать пари, что это именно так. Во всяком случае вполне возможно, что законы сохранения окажутся не только наиболее важными, но вообще *единственными* законами природы. Этих законов может оказаться достаточно для полного описания мира элементарных частиц, так как они будут определять не только, какие события могут происходить, а какие запрещены, но и относительные вероятности первых.

Мы уже подчеркивали, что законы сохранения содержат меньше ограничений, нежели законы изменения или законы дозволения. Однако существует множество различных законов сохранения, и все они вместе могут наложить очень сильные ограничения, гораздо более сильные, нежели содержатся в каждом из них. В идеальном случае они могут сохранить лишь единственную возможность. Взятые же все вместе законы запрета превращаются при этом в единственный в своем роде закон дозволения. Наиболее яркой иллюстрацией этой стороны законов сохранения служит природа фотона. Используя только законы сохранения, можно показать, что фотон — частица, которая не должна иметь массы, обладает спином, равным единице, и зарядом, равным нулю; она должна поглощаться заряженными частицами характерным образом. Этот поистине удивительный результат ярко описан Дж. Сакураи в одной из его статей: «Создатель был весьма изобретателен, когда провозглашал: „Да будет свет"»[1]). Правила поведения настолько ограничивают возможности отдельного человека, что он оказывается вынужденным действовать только одним-единственным образом, и это не приносит ему радости. Что же касается законов природы, то не может не вызвать чувств удовлетворения и восхищения тот факт, что несколько простых утверждений о постоянстве ряда величин в природе могут приобрести при их совместном рассмотрении столь большое значение, что ими будут однозначно определяться свойства света и взаимодействие света с веществом.

Но есть законы сохранения и законы сохранения. Иначе говоря, некоторые вещи в природе остаются неизменными, но другие неизменны еще в большей степени. Чтобы сделать это более ясным, скажем так: по-видимому, некоторые величины в природе абсолютно постоянны и не изменяются ни при каких обстоятельствах, другие сохраняются только в определенных процессах. Правила, которым подчиняются эти последние величины, также называют законами сохра-

[1]) Annals of Phys., 11, 1 (1960). (См. перевод в сб. «Элементарные частицы и компенсирующие поля», изд. «Мир», 1964, стр. 42.)

нения, но при определенных условиях природе позволено эти законы нарушать. Мы отложим обсуждение этих не вполне строгих законов сохранения до главы восьмой и рассмотрим здесь лишь семь законов, признанных абсолютно строгими. (Имеются еще два абсолютно строгих закона, более специального характера, но рассмотрение их мы также отложим до главы восьмой.)

Начнем с перечисления семи сохраняющихся величин:

1. Энергия (полная, включающая массу).
2. Импульс.
3. Момент количества движения (включая спин).
4. Электрический заряд.
5. Электронный (лептонный) заряд.
6. μ-мезонный (лептонный) заряд.
7. Барионный заряд.

Приведенные величины распадаются на величины, которые могут быть названы свойством движения, и величины, являющиеся внутренним свойством частиц, хотя такое разделение и не вполне четкое. Величинами, отнесенными к внутренним свойствам и входящими в законы сохранения, являются масса, спин, электрический и несколько других зарядов. К свойствам движения принадлежат кинетическая энергия, импульс и момент количества движения, причем последний часто называют орбитальным моментом, чтобы избежать путаницы со спином, который является одним из видов момента количества движения. В законах сохранения энергии и момента количества движения оба типа свойств переплетаются друг с другом.

Взаимодействия и превращения элементарных частиц позволяют прекрасно проиллюстрировать законы сохранения, и поэтому мы сконцентрируем на них свое внимание. Именно при изучении элементарных частиц были найдены подтверждения всех этих законов сохранения, хотя первые четыре были уже известны в макромире. Элементарные частицы представляют собой прекрасную почву для проверки законов сохранения, так как любой закон, справедли-

вый для небольшого числа частиц, обязательно сохраняет свою силу и во всех системах с большим числом частиц, включая макроскопические предметы окружающего нас мира. Можно ли распространять законы сохранения, действующие в микромире, на космологические масштабы, пока неясно, так как в астрономических областях основную роль приобретает тяготение, а эффекты его в мире элементарных частиц совершенно пренебрежимы.

Разнообразные внутренние свойства частиц рассматривались в главе первой, а сейчас мы поговорим сначала о законах сохранения, относящихся к этим свойствам.

Из главы первой мы знаем, что каждая частица несет либо тот же электрический заряд, что и электрон (который по определению считается отрицательным), либо равный ему по величине и противоположный по знаку заряд протона (положительный) или же оказывается нейтральной. Заряд характеризует величину электрического воздействия, которое может оказывать частица, и соответственно величину электрической силы, которая может действовать на частицу. Нейтральная частица, конечно, не оказывает и не испытывает действия электрической силы. А для заряженной частицы характерно и то, и другое.

Если заряд протона принять за единицу, то каждой частице можно приписать заряд, равный +1, —1 или 0. Закон сохранения электрического заряда требует, чтобы полный заряд оставался неизменным при всех взаимодействиях и превращениях. В этом случае для любого события с участием элементарных частиц полный заряд до того, как это событие произошло, должен иметь то же значение, что и суммарный заряд после того, как событие произошло. При распаде лямбда-частицы на нейтрон и π-мезон

$$\Lambda^0 \to n + \pi^0$$

заряд как в начале, так и в конце равен нулю. При распаде положительного π-мезона

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$

продуктами являются положительный μ-мезон и нейтральное нейтрино. При высокой энергии может происходить следующее ядерное превращение:

$$p+p\rightarrow n+\Lambda^0+K^+ +\pi^+.$$

Ни один из положительно заряженных протонов не выживает в результате этого соударения, а суммарный заряд $+2$ уносится рождающимися частицами.

Отметим, что закон сохранения электрического заряда отчасти объясняет тот факт, что электрические заряды элементарных частиц имеют одну и ту же величину[1]). Если бы заряд π-мезона составлял, скажем, 0,73 от заряда электрона, то это затруднило бы подведение баланса в превращениях и поддержание постоянной величины заряда. В действительности, согласно современным представлениям об элементарных процессах, заряд сохраняется не только *до* и *после* превращения, но и на каждом промежуточном этапе процесса. Мы можем представлять себе отдельный заряд как неделимую частицу, которая подобно эстафетной палочке может переходить от одной частицы к другой, но никогда не исчезает и не дробится.

Пожалуй, наиболее полезным следствием закона сохранения заряда с практической точки зрения является устойчивость электрона. Электрон — это самая легкая заряженная частица, и только по одной этой причине он не может распадаться. Единственные более легкие частицы — фотон, нейтрино и гравитон — нейтральны. Поэтому распад электрона обязательно приводил бы к нарушению закона сохранения электрического заряда. Ничто иное не препятствует распаду электрона. Если бы этот закон был почти, а не вполне строгим, электроны должны были бы иметь конечное время жизни. Согласно современным исследованиям, время жизни электрона превышает 10^{19} лет; это означает, что сохранение электрического заряда по крайней мере следует рассматривать как очень точное приближение к абсолютному закону.

[1]) Речь идет о наиболее стабильных частицах. По-видимому, заряд 2 приводит к значительному сокращению времени жизни. Сейчас известны частицы (или резонансы) с таким зарядом. — *Прим. перев.*

В отличие от четырех первых законов сохранения, уже известных из изучения макромира, сохранение электронного и μ-мезонного (лептонных), а также барионного зарядов было установлено при изучении превращений элементарных частиц. Смысл этих законов можно лучше всего разъяснить на конкретных примерах. Напомним, что протон и все более тяжелые частицы называются барионами. При распаде нестабильной Λ-частицы

$$\Lambda^0 \to p + \pi^-$$

один барион (Λ^0) исчезает, а другой — протон — появляется. Аналогично, число барионов не изменяется и при распаде Σ-частицы:

$$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma.$$

Отметим, что в одном из этих примеров рождается π-мезон, а в другом — фотон. Эти частицы — π-мезоны и фотоны — не принадлежат к каким-либо специальным семействам и могут исчезать и появляться в любом количестве. При типичном соударении протона с протоном число барионов (2) остается неизменным, как в приводимом ниже примере:

$$p + p \to p + \Sigma^+ + K^0.$$

Эти и множество других примеров убеждают нас, что число барионов всегда остается постоянным в каждом отдельном превращении и поэтому, конечно, и в больших масштабах.

Каждая из Ω-, Ξ-, Σ- и Λ-частиц, а также нейтрон испытывают самопроизвольный распад на более легкий барион. Но самому легкому из барионов — протону — не на что распадаться. Закон сохранения числа барионов делает протон устойчивым и тем самым обеспечивает существование ядер, атомов, а следовательно, и окружающего нас мира. С точки зрения физики элементарных частиц это кажется поистине сверхъестественным, ибо по величине своей массы протон находится на уровне около 2000 электронных масс, обладая внутренней энергией около одного миллиарда электронвольт, тогда как ниже по массам

расположены более легкие и в то же время неустойчивые K-, η-, π- и μ-мезоны. Этот огромный запас энергии удерживается внутри протона только благодаря закону сохранения барионного заряда, который обеспечивает тем самым строительный материал нашей Вселенной. Протон, по-видимому, абсолютно устойчив. Если он все же неустойчив, то, согласно последним экспериментальным результатам, его период полураспада превышает $7 \cdot 10^{27}$ лет, или в миллиард миллиардов раз больше возраста Земли.

Наша формулировка закона сохранения барионного заряда требует некоторого уточнения, так как мы пока не учли антибарионов. Типичный процесс рождения антипротона выглядит следующим образом:

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}.$$

(Черточка над буквой означает античастицу. Полный электрический заряд, равный $+2$, сохраняется, так как антипротон несет отрицательный электрический заряд.) Может показаться, что нам удалось превратить два бариона в четыре. Аналогичным образом может показаться, что при аннигиляции антипротона

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

два бариона исчезают. Совершенно очевидно, что для того, чтобы не нарушать закон сохранения барионов, надо приписать античастицам барионный заряд -1, а частицам барионный заряд $+1$. Тогда закон сохранения принимает следующий вид: в каждом превращении сохраняется полное число барионов *за вычетом* полного числа антибарионов, или, что то же самое, полный барионный заряд остается неизменным.

Не удивительно, может заметить скептик, что при таком числе произвольных определений — какие частицы следует называть барионами, а какие нет — и использовании отрицательного барионного заряда удается построить закон сохранения. Чтобы возразить ему, приведем два прекрасных примера. Во-первых, не так-то уж легко найти абсолютный закон сохранения. Отыскать в природе абсолютно сохраняющуюся величину настолько важно, что это вполне

оправдывает появление нескольких произвольных определений. На этой стадии развития наших знаний некий произвол лишь отражает отсутствие у нас сколько-нибудь глубокого понимания причин сохранения барионного заряда. Однако это не умаляет очевидного значения сохранения числа барионов как закона природы. Второе наше возражение основано на математическом аппарате квантовой теории и состоит в том, что приписывать античастицам отрицательный барионный заряд совершенно естественно и фактически есть необходимое следствие теории. Рождение античастицы описывается «эквивалентно» исчезновению частицы (мы не можем углубляться здесь в математику) [1]) и, обратно, исчезновение античастицы «эквивалентно» рождению частицы.

К «электронному семейству» принадлежит лишь электрон и его нейтрино; к «μ-мезонному семейству» принадлежит только μ-мезон и его нейтрино. В каждом из этих крошечных семейств существует свой закон сохранения специфического заряда совершенно аналогично сохранению барионного заряда. Члены семейств с отрицательным электрическим зарядом должны рассматриваться как частицы, а с положительным зарядом — как античастицы. Вследствие трудностей, связанных с изучением нейтрино, эти законы сохранения специфических (лептонных) зарядов легких частиц проверены не столь подробно, как другие абсолютные законы, хотя не известны случаи их нарушения.

Прекрасной иллюстрацией обсуждавшихся законов сохранения служит β-распад нейтрона

$$n \to p + e^- + \overline{\nu}_e.$$

В начальном состоянии нейтрон имеет нулевой электрический заряд, барионный заряд, равный единице, и электронный заряд, равный нулю. Благодаря противоположным электрическим зарядам у протона и электрона полный заряд остается равным нулю, протон

[1]) В главе седьмой античастицы будут описываться «как частицы, движущиеся в противоположном направлении во времени».

обеспечивает единичный барионный заряд, а электрон с антинейтрино ($\overline{\nu_e}$) — нулевой электронный заряд. При распадах π-мезонов

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{и} \quad \pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu}$$

закон сохранения μ-мезонного заряда требует, чтобы нейтрино сопровождало μ^+-мезон, античастицу, а антинейтрино сопровождало μ^--мезон. В свою очередь μ-мезон распадается на три частицы, например

$$\mu^- \to e^- + \nu_\mu + \overline{\nu_e},$$

благодаря чему обеспечивается сохранение μ-мезонного и электронного (лептонных) зарядов.

Общее правило, сформулированное ранее в этой главе, гласило, что все, что *может* происходить без нарушения законов сохранения, *действительно* происходит. До 1962 г. существовало примечательное исключение из этого правила; его опровержение послужило мощной поддержкой представления о том, что законы сохранения играют центральную роль в мире элементарных частиц. Распад μ-мезона на электрон и фотон

$$\mu^- \to e^- + \gamma$$

никогда не наблюдался, и это обстоятельство было известно как загадка μ-e-γ, или μ-e-γ — парадокс. До того как было открыто μ-мезонное нейтрино, считалось, что электрон, μ-мезон и нейтрино принадлежат к одному семейству, называемому лептонным, с единым законом сохранения лептонного заряда. Если бы это было действительно так, то ни один из законов сохранения не запрещал бы распад μ-мезона на электрон и фотон, поскольку электрон компенсировал бы исчезновение μ-мезона, а электрический заряд и все остальные величины тоже сохранялись бы. Согласно классическому представлению о законах физики, отсутствие этого процесса не должно было вызвать интереса. В конце концов нет закона дозволения, который говорил бы, что такой процесс должен происходить. Имелось лишь утверждение, содержавшее двой-

ное отрицание: ни один из известных законов сохранения не запрещает этот распад.

Однако представление о фундаментальном значении законов сохранения в природе как единственных запретов, налагаемых на физические процессы, настолько завладело умами физиков, что отсутствие этого особого способа распада рассматривалось как существенное недоразумение. Именно это недоразумение в значительной степени и стимулировало поиски второго нейтрино, принадлежащего только μ-мезонному семейству. Открытие μ-мезонного нейтрино установило почти как непреложный факт, что электрон и μ-мезон относятся к двум различным небольшим семействам с самостоятельными законами сохранения. Существование самостоятельных законов сохранения для электрона и μ-мезона сделало совершенно очевидным наличие запрета на распад $\mu \to e+\gamma$ и еще больше укрепило веру в то, что все, что может произойти, действительно происходит.

Перейдем теперь к законам сохранения величин, являющихся свойством движения (первые три закона из записанных на стр. 116).

В мире элементарных частиц мы встречаемся с энергией только двух типов: энергией движения, или кинетической энергией, и собственной энергией, сопоставляемой массе покоя частицы. Всякий раз, когда происходит образование и уничтожение частиц (за исключением частиц с массой, равной нулю), энергия превращается из одной формы в другую, хотя полная энергия всегда остается постоянной. Простейшее следствие закона сохранения энергии для спонтанного распада нестабильных частиц заключается в том, что полная масса продуктов распада должна быть меньше массы родительской частицы. Для каждого из выписанных ниже процессов:

$$K^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-,$$
$$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-,$$
$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu_\mu}$$

сумма масс в правой части меньше массы в левой части. В частности, невозможен распад частицы

с массой, равной нулю, и закон сохранения энергии запрещает любой распад, продукты которого оказались бы тяжелее исходной частицы. Нестабильная частица, находящаяся в состоянии покоя, обладает только энергией покоя и не имеет энергии движения. Разница между массой исходной частицы и массой частиц-продуктов служит источником той кинетической энергии, которую уносят частицы-продукты, покидая место действия.

Можно было бы рассчитывать, что если исходная частица двигалась в момент распада, то часть ее энергии движения превратится в массу. Но закон сохранения импульса запрещает это. Дополнительная энергия движения в действительности «бесполезна» с точки зрения превращения энергии в массу. Если частица теряет энергию, то она теряет и импульс. Поэтому закон сохранения импульса ограничивает превращение энергии в массу. Оказывается, что законы сохранения энергии и импульса, вместе взятые, запрещают распад на более тяжелые частицы независимо от скорости, с какой могла двигаться первичная частица.

С другой стороны, при столкновении двух частиц часть их энергии движения, хотя и не целиком, может служить источником увеличения массы. Именно таким способом и получают в лаборатории различные нестабильные частицы. Обычно при осуществлении столкновения на ускорителе одна из двух частиц (падающая частица) быстро движется, а другая (частица-мишень) покоится. В этих условиях требование, чтобы импульс конечных частиц был точно равен импульсу падающей частицы, строго ограничивает количество энергии, которое может превратиться в массу. Это очень печально, так как заставляет сообщать падающей частице энергию с большим избытком. Например, чтобы обеспечить рождение пары протон — антипротон при бомбардировке неподвижной мишени падающими частицами, последним необходимо сообщить кинетическую энергию 6 *Гэв*, из которых на «производство» массы расходуется лишь 2 *Гэв*. Ускоритель в Беркли на 6 *Гэв* (Беватрон) был спроектирован с учетом именно этого обстоятельства так, чтобы на нем могли рождаться антипротоны и антиней-

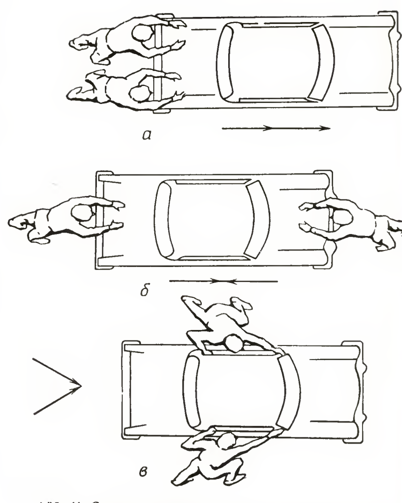
троны. При соударении протонов с протонами обычно происходят реакции типа

$$p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p},$$
$$p+p \rightarrow p+p+n+\bar{n}.$$

Неприятного перерасхода энергии в 4 *Гэв* в этих реакциях можно было бы избежать, если бы протон-мишень не покоился, а летел навстречу падающему протону с такой же скоростью. Но создание пучков частиц высокой энергии — достаточно трудная проблема, а создание одновременно двух пучков — еще более сложная задача. Тем не менее игра стоит свеч, так как выигрыш в «полезной» энергии, которая может быть превращена в массу, значителен, и в Стэнфордском университете (США) в настоящее время имеется установка, предназначенная для создания «встречных пучков», в которой сталкиваются движущиеся в противоположные стороны два электронных пучка [1]).

Импульс характеризует исключительно состояние движения. Иными словами, если нет движения, то нет и импульса. Понятие импульса несколько хитроумнее, чем понятие энергии, так как импульс — это так называемый вектор. Кроме величины, он имеет и направление. Мы часто сталкиваемся с векторами в повседневной жизни, хотя можем и не знать, что это векторы. Скорость автомобиля, характеризуемая величиной (например, 70 *км/час*) и направлением (например, на север), есть вектор. Сила, характеризуемая величиной усилия и направлением, в котором оно приложено, есть вектор. А вот масса не является векторной величиной. Она не связана с каким-либо определенным направлением. Энергия тоже не связана с направлением. В то же время импульс движуще-

[1]) Работы по осуществлению соударений встречных пучков ведутся во многих лабораториях мира, в том числе и в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР, в научных центрах в Италии, Франции и в других местах. Особое внимание уделяется проблеме создания встречных электрон-позитронных пучков, на которых благодаря процессу аннигиляции вся полная энергия первичных частиц может целиком превратиться в конечные продукты. — *Прим. перев.*



ФИГ. 14. *Сложение векторов.*

Сила, с которой воздействуют два человека, толкающие машину с одинаковым усилием, в результате сложения может принимать любое значение от нуля до удвоенного усилия каждого.

гося товарного вагона направлен вдоль колеи, а импульс элементарной частицы — вдоль ее пути в пространстве.

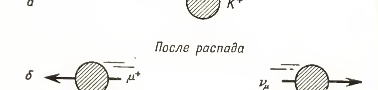
Чтобы уяснить смысл закона сохранения импульса, необходимо знать правило сложения векторов. Два человека, толкающие остановившийся автомобиль, заняты сложением векторов. Если они прилагают одинаковое усилие и толкают машину в одном и том же направлении, то полная действующая сила вдвое превосходит усилие каждого толкающего и, естественно, направлена в ту же сторону (фиг. 14, *а*). Если они толкают машины с одинаковой силой, но в противоположные стороны, то их усилия тратятся даром, так как сумма двух векторов, равных по величине и противоположных по направлению, есть нуль (фиг. 14, *б*). Если же они встанут по сторонам машины (фиг. 14, *в*) и будут толкать ее частично вбок, а частично вперед, то результирующее воздействие будет направлено вперед, но по своей величине будет меньше, чем удвоенная сила, прилагаемая каждым. В зависимости от согласованности их действий эти люди могут получить результирующее усилие, которое будет лежать в интервале от нуля до удвоенного значения силы, прилагаемой каждым. Это общая характеристика суммы двух векторов. Она может принимать те или иные значения в широком диапазоне в зависимости от взаимной ориентации двух векторов.

Рассмотрим закон сохранения импульса применительно к распаду K-мезона на μ-мезон и нейтрино:

$$K^+ \to \mu^+ + \nu_\mu.$$

Предположим, что до распада K-мезон покоился (фиг. 15, *а*). Закон сохранения импульса требует, чтобы после распада μ-мезон и нейтрино разлетались с одинаковыми по величине и противоположными по направлению импульсами (фиг. 15, *б*). Только при этом условии векторная сумма двух конечных импульсов будет равна начальному импульсу, т. е. нулю. Распад такого типа, называемый двухчастичным, или распадом на две частицы, встречается довольно часто и всегда характеризуется разлетом частиц точно в противоположных направлениях.

При распаде на три частицы этим частицам предоставлена бо́льшая свобода. Например, на фиг. 8 (стр. 38) изображен распад K-мезона на три π-мезона, причем следы последних направлены в разные стороны. Вспоминая аналогию между импульсом и силой, мы можем представить себе такой случай, когда в результате действия трех различных сил получается нулевой эффект, скажем два противника и рефери все тянут в разные стороны. Аналогично, векторы импульсов должны складываться так, чтобы



ФИГ. 15. *Сохранение импульса при распаде К-мезона.*
Полный момент равен нулю как до, так и после распада.

результирующий эффект был равен нулю; иными словами, их сумма должна обратиться в нуль. Сохранение импульса в большом масштабе иллюстрируется фиг. 16, на которой изображен процесс, сопровождающийся разлетом восьми частиц.

Закон сохранения импульса категорически запрещает распад на одну частицу. Рассмотрим, например, возможность превращения K-мезона в π-мезон

$$K^+ \to \pi^+.$$

Этот процесс удовлетворяет законам сохранения различных зарядов. Он совместим с законом сохранения энергии, так как сопровождается уменьшением массы, а также сохраняет спин. Но разность масс K- и π-мезонов должна превращаться в энергию движения, так что если K-мезон покоился, то π-мезон будет двигаться. В каком бы направлении он ни двигался, π-мезон будет обладать каким-то импульсом,

а это противоречит закону сохранения импульса, так как K-мезон импульса не имел. С другой стороны, если мы облегчим выполнение закона сохранения импульса и удержим π-мезон в состоянии покоя, то мы нарушим закон сохранения энергии, ибо в этом случае некуда будет девать избыток энергии, обусловленный разностью масс.

Момент количества движения служит мерой интенсивности вращательного движения и со времен Кеплера является одним из основных физических понятий. В действительности Кеплер еще не отдавал себе отчета в этом, но второй из трех его законов движения планет, так называемый закон площадей, эквивалентен закону сохранения момента количества движения. Этот закон гласит, что воображаемая прямая линия, проведенная от Земли к Солнцу, «заметает» в пространстве одинаковые площади в единицу времени. На протяжении одного дня эта линия «заметает» треугольную область с вершиной на Солнце и основанием вдоль земной орбиты. Площадь этого треугольника оказывается одинаковой в любое время года. Таким образом, когда Земля оказывается ближе к Солнцу, она должна двигаться быстрее, чтобы описать треугольник такой же площади. В действительности ее скорость возрастает как раз настолько, чтобы поддерживать постоянным момент количества движения, и закон площадей можно получить в виде простого следствия закона сохранения момента количества движения (впервые это было сделано Ньютоном).

Земля служит также грубой иллюстрацией двух видов момента количества движения, которые входят в закон сохранения, — орбитального и спинового. Земля обладает моментом вследствие своего движения по орбите вокруг Солнца и суточного (спинового) вращения вокруг собственной оси. Для элементарных частиц понятие спина оказывается примерно таким же, оно означает вращательное движение вокруг оси.

Если бы фотограф сделал из космоса с выдержкой снимок Земли и Солнца, то Солнце получилось бы слегка размытым, а Земля — гораздо сильнее. Он мог бы отметить, что размытия не направлены навстречу друг другу, и уже на основании одного этого



факта пришел бы к выводу, что Земля и Солнце обладают относительным моментом количества движения. Ему не нужно было бы знать, вращается ли Земля вокруг Солнца или просто движется в межзвездном пространстве. Основным условием существования орбитального момента является нелобовой характер движения двух предметов. Любые два предмета, не направляющиеся непосредственно один к другому, обладают относительным моментом количества движения. Два поезда, идущие по равнине, имеют относительный момент количества движения, хотя каждый движется по прямой. Но если бы вследствие роковой ошибки поезда пошли бы по одному пути навстречу друг другу и им грозило бы столкновение, то в этом случае их момент количества движения был бы равен нулю. При столкновении и распадах частиц орбитальный момент, как правило, имеет то же происхождение, что и в случае движения поездов по равнине, и не является результатом действительного вращения одной частицы вокруг другой. На фиг. 17 показаны примеры движения с моментом количества движения.

Момент количества движения представляет собой векторную величину. За его направление принимается ось вращения. В случае спинового вращения ось точно определена. А в случае орбитального движения? Вообразим снова расплывчатую фотографию, на которой видно направление движения поездов. Зададим теперь вопрос: какой была бы ось, если бы каждый поезд не двигался в своем направлении, а оба вращались бы относительно друг друга? Ответим: вертикальной, причем момент количества движения был бы направлен вверх. Необходимо знать еще один факт относительно орбитального

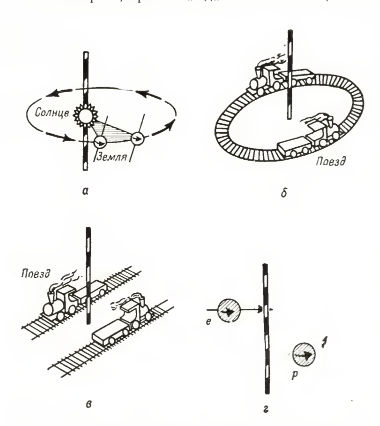
◀

ФИГ. 16. *Сохранение импульса при аннигиляции антипротона.*

Движущийся снизу аитипротои сталкивается с протоном в пузырьковой камере. В результате аиннгиляцнн возннкает 8 мезонов (4 — отрнцательиых и 4 — положнтельиых), разлетающнхся во всех направлеииях. По кривизие следа можио нзмернть импульс каждого π-мезона; векторная сумма восьмн нмпульсов π-мезоиов как раз равна импульсу падающего антнпротоиа. (Излом следа справа в иижией частн фотографии соответствует распаду π-мезоиа: $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$. А в каком направленни улетает невиднмое иейтрнно?)

момента. В отличие от спина, который принимает значения, кратные $\hbar/2$, орбитальный момент принимает только значения, кратные $\hbar$.

Не имеющий спина π-мезон распадается на μ-мезон и нейтрино, причем каждая из этих частиц имеет



ФИГ. 17. *Примеры движения с моментом количества движения.*

а — Земля имеет спиновый момент относительно своей оси и орбитальный момент относительно оси, обозначенной вертикальной линией. Постоянство момента количества движения Земли означает, что для всех дней в году заштрихованная площадь, «заметаемая» за день, будет одна и та же; *б* — поезд, идущий по круговой колее, будет иметь момент количества движения; *в* — даже на прямолинейной колее относительное движение поездов будет характеризоваться моментом количества движения; *г* — электрон пролетает мимо протона; обе частицы имеют спиновые моменты и вследствие нелобового характера столкновения обладают также орбитальным моментом количества движения.

спин, равный $^1/_2$. Мы воспользовались фантазией художника и изобразили на фиг. 18 частицы в виде маленьких сфер со стрелками, указывающими направления их вращения (спина). Мы видим, что μ-ме-





ФИГ. 18. *Сохранение момента количества движения при распаде π-мезона.*

Полный момент количества движения равен нулю как до, так и после распада.

зон и нейтрино вращаются в противоположные стороны, сохраняя полный момент количества движения, равным нулю. В этом примере орбитальный момент отсутствует.

Еще одним примером распада на две частицы, иллюстрирующим связь спина с орбитальным движением, является распад Λ-частицы. Эта частица имеет спин, равный $^1/_2$, и первоначально предполагается покоящейся (фиг. 19, *а*). Один из возможных путей распада таков:

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-.$$

Этот распад может происходить двумя способами. Может оказаться, что протон и π-мезон разлетаются, не имея орбитального момента, а спин протона направлен вверх, т. е. так же, как и спин исходной Λ-частицы (фиг. 19, *б*). А может быть, спин протона окажется перевернутым вниз, причем протон и π-мезон разлетаются с единичным моментом количества движения, который направлен вверх (фиг. 19, *в*).

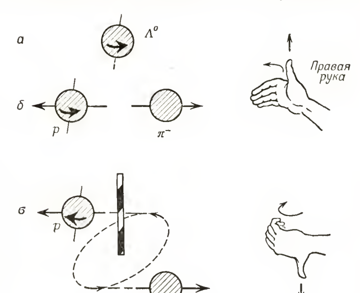
В первом случае:

Начальный спин $^1/_2$ (вверх) → Конечный спин $^1/_2$ (вверх).

Во втором случае:

Начальный спин $^1/_2$ (вверх) → Конечный спин $^1/_2$ (вниз) + + Орбитальный момент 1 (вверх).

Первый известный процесс распада частиц, β-распад, прекрасно иллюстрирует все обсуждавшиеся



ФИГ. 19. *Сохранение момента количества движения при распаде Λ-частицы.*

Направление момента количества движения определяется правилом правой руки. Если согнутые пальцы правой руки указывают направление вращательного движения, то большой палец будет определять направление момента количества движения. Так, на фиг. *а* и *б* спин направлен вверх, а на фиг. *в* — вниз, орбитальный момент направлен здесь вверх.

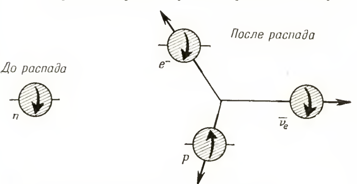
выше абсолютные законы сохранения. Символически β-распад нейтрона изображается следующим образом:

$$n \to p + e^- + \overline{\nu_e}.$$

Он схематически изображен на фиг. 20. Рассмотрим теперь законы сохранения применительно к этому распаду.

Энергия. Как видно из табл. 1, сумма масс протона (938,256), электрона (0,511) и электронного нейтрино (0) меньше массы нейтрона (939,550). Таким образом, распад разрешен из энергетических соображений, и небольшой избыток массы является источником кинетической энергии продуктов.

Импульс. Три частицы должны разлетаться в разные стороны, причем избыток энергии будет распределяться между ними так, чтобы сумма трех векторов импульса обращалась в нуль.



ФИГ. 20. *Бета-распад нейтрона,* $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$.

Момент количества движения. Одна из возможностей, которую иллюстрирует фиг. 20, состоит в том, что электрон и протон разлетаются с противоположными спинами, а спин нейтрино направлен в ту же сторону, что и спин нейтрона, благодаря чему и имеет место сохранение момента количества движения.

Электрический заряд. Конечный электрический заряд (1 положительный, 1 отрицательный и 1 нулевой) равен нулю, т. е. совпадает с исходным зарядом нейтрона.

Электронный (лептонный) заряд. Электронный заряд нейтрона равен нулю. При распаде образуются электрон и антинейтрино ($\bar{\nu}_e$), сохраняющие нулевой электронный (лептонный) заряд.

μ-мезонный (лептонный) заряд. При распаде не возникает и не исчезает ни одного члена μ-мезонного семейства.

Барионный заряд. Протон является единственным барионом среди конечных продуктов, сохраняющим исходное число барионов.

Теперь мы хотим предложить читателю следующее упражнение. Ниже выписаны уравнения распадов и реакций, которые *не происходят* в природе. Если в левой части уравнения стоит только одна частица, то речь идет о процессе распада, если стоят две частицы, то о реакции. Каждый из этих процессов запрещен по крайней мере одним законом сохранения. Вам следует найти для каждого процесса по крайней мере один нарушаемый им закон сохранения. В некоторых процессах нарушается несколько законов, а в одном — пять из семи законов сохранения (ответы приведены в конце главы):

1. $\mu^+ \to \pi^+ + \nu_\mu$,
2. $e^- \to \nu_e + \gamma$,
3. $p + p \to p + \Lambda^0 + \Sigma^+$,
4. $\mu^+ \to \Lambda^0$,
5. $n \to \mu^+ + e^- + \gamma$,
6. $\Lambda^0 \to p + e^-$,
7. $\pi^- + p \to \pi^- + n + \Lambda^0 + K^+$,
8. $e^+ + e^- \to \mu^+ + \pi^-$,
9. $\mu^- \to e^- + e^+ + \nu_\mu$.

С точки зрения теоретиков и философов, законы сохранения представляют собой наиболее изящную

и глубокую формулировку законов природы ввиду их связи с принципами симметрии в природе. Грубо говоря, такие величины, как энергия, импульс и момент количества движения, — все сохраняются благодаря тому, что пространство и время изотропны (т. е. одинаковы во всех направлениях) и однородны (т. е. одинаковы во всех точках). Если кто-либо бросает тень на это феноменальное утверждение, то следует иметь в виду: оно подразумевает, что три из семи абсолютных законов сохранения обусловлены просто тем, что пустое пространство не имеет особых отметок и везде одинаково пусто и одинаково неразличимо. (Вследствие релятивистской связи пространства и времени мы в действительности имеем в виду пространство-время.) В буквальном смысле мы получаем что-то из ничего.

И все же не может быть сомнений в наличии связи между свойствами пустого пространства и фундаментальными законами сохранения, управляющими поведением элементарных частиц. Эта связь выдвигает философские проблемы, которые мы только упомянем, не задерживаясь на них сколько-нибудь подробно. С одной стороны, можно было бы думать, что законы сохранения, в основе которых лежат самые простые и интуитивные представления, являются наиболее глубоким выражением законов природы. С другой стороны, можно считать, подобно Бертрану Расселу[1]), что они демонстрируют лишь пустоту законов сохранения («трюизмы» по Расселу), поскольку энергии, импульсу и моменту количества движения даны такие определения, что они должны сохраняться. На самом деле не так уж непоследовательно придерживаться обеих точек зрения. Если цель науки состоит в том, чтобы, используя простейшую систему исходных предложений, дать непротиворечивое описание явлений природы, то что может быть удовлетворительнее исходных предположений (типа однородности пространства-времени), настолько простых и самоочевидных, что полученные на основе их законы могут быть названы трюизмами?

[1]) Bertrand Russel, The ABC of Relativity, New York, 1959.

Как правило, ученые склонны называть наиболее глубоким то, что оказывается наиболее простым и наиболее общим. Поэтому они недалеки от того, чтобы считать глубоким и трюизм. Более догматически мы должны рассматривать как некое достижение открытие *любой* абсолютно сохраняющейся характеристики независимо от произвольных определений. Обращаясь к тем законам сохранения, предпосылки которых остаются пока неясными (три закона сохранения специфических зарядов), мы также приходим к выводу, что закон сохранения проще назвать трюизмом после того, как он был понят, нежели до этого. Очень может быть, что наши представления о природе и ее законах значительно углубятся прежде, чем закон сохранения барионного заряда покажется кому-либо самоочевидной истиной.

Прежде чем попытаться на простых примерах выяснить связь между законами сохранения и однородностью пространства, ответим на вопрос: что такое симметрия? В наиболее общем виде симметрия означает, что при определенном изменении одного (A) нечто другое (B) остается неизменным. Симметричным является лицо, внешность которого (B) не изменится, если поменять местами обе половины (A). При повороте квадрата (A) на 90° его внешний вид (B) не меняется. Наиболее симметричным среди плоских фигур является круг, ибо при вращении его относительно центра на любой угол он остается тождественным исходному кругу. На языке современной физики форма круга остается инвариантной. На языке древних греков круг — наиболее совершенная и красивая из плоских фигур.

Аристотель считал, что движение небесных тел происходит обязательно по кругу в силу совершенства (симметрии) последнего. Далее, еще более глубокая симметрия пространства-времени позволила найти эллипсы Кеплера. Современная наука смогла возникнуть лишь после того, как сбросила оковы векового господства аристотелевой физики. Однако теперь она вновь нежданно обрела аромат аристотелевых представлений из-за все большего укрепления главенствующей роли принципов симметрии и все возрастающего влияния геометрических основ физики.

У нас сложилась привычка представлять себе симметрию в пространственных образах. Симметрия круга, квадрата, лица ассоциируется с вращениями или отражениями (инверсиями) пространства. Симметрия времени является очевидным расширением понятия пространственной симметрии. То обстоятельство, что законы природы не меняются с течением времени, представляет собой фундаментальное свойство симметрии природы. Однако существуют и некоторые более тонкие типы симметрии, и можно думать, что понимание, к примеру, сохранения барионного заряда придет к нам благодаря обнаружению новых типов симметрии, не связанных непосредственно со свойствами пространства и времени.

Интерес ученых к симметрии обусловлен неизменностью, или инвариантностью вида законов природы. Изменяться может ориентация или положение объекта в пространстве, или время, или, наконец, более абстрактное понятие (не обязательно то, что происходит в действительности), как, например, перестановка двух частиц. Отражение (инверсия) пространства и обращение течения времени также служат примерами тех изменений, которые не осуществляются на практике, но представляют интерес для выяснения симметрии законов природы. Последние будут обсуждаться в главе восьмой.

Если ученые в Чикаго, Нью-Йорке и Женеве проводят один и тот же эксперимент и получают (в пределах ошибок опыта) одинаковый результат, то они тем самым демонстрируют симметрию природы, однородность пространства. Если эксперимент будет повторен впоследствии и даст тот же результат, никто не удивится, ибо мы считаем время однородным. Насколько нам известно, законы природы одинаковы везде в любой точке пространства и во все времена. Эта важная инвариантность связана с законами сохранения энергии и импульса. Однако привычный опыт заставляет нас ожидать этой инвариантности, и на первый взгляд она может показаться тривиальной или самоочевидной. Любая наука вообще с трудом поддавалась бы четкому описанию, если бы законы природы в разных местах или в разное время были бы иными, но качественная наука вполне реальна

и при отсутствии однородности пространства-времени. Представьте, что вы кружитесь на карусели, которая то ускоряется, то замедляется. И происходит это вполне регулярно. Если вы будете при этом ставить эксперименты для установления законов механики, не зная, что находитесь на вращающейся системе, то придете к выводу, что падающий мяч подчиняется законам, зависящим от времени и места (расстояния от оси вращения). Вы вполне сможете дать подробную формулировку законов и точно предсказать результаты будущих экспериментов, если только вам будет известно, где и когда они будут проведены. В действительности же благодаря истинной однородности пространства и времени результаты будущих экспериментов можно предсказать независимо от того, где и когда они будут проводиться.

Несколько менее очевидна, хотя также хорошо известна из повседневного опыта, инвариантность законов природы относительно равномерного движения систем. При идеально гладком пути пассажиры поезда или лифта не ощущают движения. Если бы законы механики существенно менялись, то пассажиры, несомненно, знали бы, что они движутся, так как физические ощущения их были бы необычными. Подобный качественный путь, конечно, не вполне надежен, однако тщательные опыты, проведенные внутри равномерно движущегося поезда, обнаружили бы те же законы природы, что и соответствующие опыты, выполненные в стационарной лаборатории. Подобная инвариантность лежит в основе теории относительности и является проявлением изотропии четырехмерного пространства-времени, на чем, к сожалению, мы не можем подробно останавливаться. То, что для нашего ограниченного трехмерного воображения представляет собой равномерное движение, для более просвещенного человека, способного охватить четыре измерения, будет просто вращением. Вместо того чтобы повернуть, скажем, с севера на восток, экспериментатор на поезде, исходя из более общей точки зрения, совершит поворот из пространства немного в сторону оси времени. Согласно теории относительности, которая соединила пространство и время в че-

тырехмерное пространство-время, законы природы должны меняться при «повороте» экспериментальной установки в сторону времени (т. е. при погрузке ее в вагон) не более, чем при ее вращении на 90° в лаборатории.

Мы рассмотрели следующую цепочку связи: симметрия → инвариантность → сохранение. Симметрия пространства и времени и, возможно, некоторые неуловимые свойства симметрии природы подразумевают инвариантность физических законов относительно определенных изменений, связанных с той или иной симметрией. Например, в простейшем случае симметрия пространства, которую мы называем ее однородностью, предполагает инвариантность экспериментальных результатов при перемещении приборов с одного места на другое. В свою очередь эта инвариантность влечет за собой существование определенных законов сохранения. Мы хотим проиллюстрировать сейчас на двух примерах связь законов сохранения с принципами симметрии. К сожалению, квалифицированное обсуждение этой важной связи требует использования математики, что не входит в задачу данной книги.

Представим себе отдельный изолированный атом водорода, покоящийся сам по себе в пустом пространстве. Если бы мы были в состоянии видеть этот атом, не воздействуя на него, то что бы мы увидели? (В этих рассуждениях мы не будем вспоминать о квантовой механике и волновой природе частиц и будем делать вид, что электрон и протон можно видеть по отдельности как частицы, на которые не влияет наблюдатель. Читателю следует принять эти предположения, ибо, несмотря на их ложный характер, они допустимы и несущественны для настоящего обсуждения.) Мы увидели бы электрон, быстро вращающийся вокруг протона, и протон, движущийся более медленно по окружности меньшего радиуса. Если мы будем удаляться, пока атом не станет различим лишь как отдельное пятно, то это пятно, если оно было вначале неподвижно, останется навсегда в покое. Мы должны теперь спросить: насколько важно это обстоятельство, имеет ли оно значение? Оно наверняка не должно казаться неожиданным. Можно спросить: а почему атом

должен двигаться? Он изолирован от остальной части Вселенной, на него не действуют внешние силы, и поэтому нет причины, которая привела бы его в движение. Если мы оставим на столе книгу и вспомним о ней позже, то мы надеемся найти ее на прежнем месте. Повседневный опыт убеждает нас, что предмет, на который не действуют внешние силы, самопроизвольно не может двигаться. Поэтому и для атома не больше причин начать движение, нежели для книги вдруг переместиться на столе или отлететь в угол. Слабость этих аргументов состоит в том, что они используют здравый смысл для оценки повседневного опыта, не предлагая какого-либо объяснения этому.

Если же мы забудем о «здравом смысле» и спросим, что мог бы «предпринять» атом, то далеко не очевидно, что он должен оставаться в покое. Несмотря на отсутствие внешних сил, в атоме «работают» большие внутренние силы. Протон оказывает воздействие на электрон, который постоянно изменяет свое движение; в свою очередь электрон воздействует на протон. Обе составные части атома испытывают воздействие сил. Почему эти силы не могут привести атом как целое в движение? Поставив так вопрос, мы можем снова обратиться к книге, лежащей на столе. Книга состоит из бесчисленного множества атомов, каждый из которых оказывает воздействие на соседние атомы. Какое чудо заставляет эти силы столь точно компенсировать друг друга, что на книгу как целое не действует никакой результирующей силы и она остается в покое на столе?

Классический подход к этой проблеме состоит в том, что надо найти закон дозволения, т. е. закон, который гласит, что́ *должно* происходить. Ньютон первым сформулировал этот закон, который выдержал все испытания временем (за исключением небольших модификаций, внесенных теорией относительности). Его назвали Третьим законом Ньютона. Этот закон гласит, что все силы в природе сбалансированы, т. е. встречаются в виде равных и противоположно направленных пар. Сила, действующая со стороны протона на электрон, в точности равна и противоположна по

направлению силе, действующей на протон со стороны электрона. Сумма этих двух сил (*вектор* суммы) равна нулю, так что система в целом не стремится двигаться в каком-либо направлении. Равенство сил, кроме того, может быть связано с равенством импульсов. Используя Второй закон Ньютона[1]), который связывает движение с вызывающей его силой, можно обнаружить, что в первоначально покоившемся атоме воводорода равенство сил приведет к равенству и противоположной направленности импульсов протона и электрона. В любой момент обе частицы движутся в противоположных направлениях. Более тяжелый протон движется медленнее, но с тем же импульсом, что и электрон. По мере того как электрон меняет направление движения и скорость, с протоном происходит то же самое, причем именно так, что его импульс остается равным по величине и противоположным по направлению импульсу электрона. Несмотря на непрерывное изменение импульсов обеих частиц, полный импульс атома будет равен нулю; атом остается недвижим. Таким путем, «открыв» и использовав Второй и Третий законы Ньютона, можно получить закон сохранения и дать объяснение тому, что изолированный атом не может прийти в движение.

Те же аргументы можно без труда применить и к книге, лежащей на столе. Поскольку все силы встречаются в виде равных и противоположно направленных пар, силы, действующие между каждой парой атомов, компенсируют друг друга и полная сила обратится в нуль, каким бы большим не было число атомов и отдельных сил.

Имеет смысл повторить отдельные этапы приведенных выше рассуждений. Были выявлены два закона дозволения, гласящие, что́ должно происходить. Один из законов устанавливает связь движения с вызывающей его силой, другой утверждает, что силы,

[1]) Второй закон Ньютона (его обычная запись $\mathbf{F}=m\mathbf{a}$) гласит, что произведение ускорения $\mathbf{a}$, испытываемого телом, и его массы m равно силе $\mathbf{F}$, действующей на тело. Этот закон можно сформулировать еще следующим образом: скорость, с которой происходит изменение импульса тела, равна приложенной силе.

действующие между двумя телами, всегда равны по величине и противоположны по направлению. Из этих законов в качестве интересного следствия было установлено сохранение импульса, и этот закон сохранения в свою очередь объяснил, почему изолированный покоящийся атом остается в состоянии покоя.

Современный подход к этой проблеме лежит в совершенно иной плоскости. Он заключается в поисках закона запрета или принципа, объясняющего, почему атом *не должен* двигаться. Таким принципом является инвариантность законов природы по отношению к изменению места. Напомним последовательность основных представлений, которая упоминалась на стр. 141: симметрия → инвариантность → сохранение. В примере с изолированным атомом водорода симметрией, о которой идет речь, является однородность пространства. Эта симметрия лежит в основе только что упоминавшегося принципа инвариантности. Наконец, законом сохранения, который покоится на этом принципе инвариантности, является закон сохранения импульса.

Чтобы выяснить на примере атома водорода связь между предполагаемой однородностью пространства и законом сохранения импульса, нам следует начать со строгой формулировки принципа инвариантности применительно к нашему изолированному атому. Этот принцип состоит в следующем: ни одно из свойств движения изолированного атома не зависит от положения его центра масс. Центр масс любого тела представляет собой среднее положение всей массы, сосредоточенной в теле. В случае атома водорода центр масс расположен в точке пространства между электроном и протоном, ближе к более массивному протону.

Заменим наш изолированный атом водорода, находящийся в пустом пространстве, его покоящимся центром масс. Предположим далее, что центр масс пришел в движение. В каком направлении должен он двигаться? Мы сразу оказываемся лицом к лицу с проблемой однородности пространства. Наделив наш атом на мгновение человеческими качествами, мы могли бы сказать, что у него нет оснований «решить», куда ему двигаться. Для атома, решающего, какую возможность выбрать, все направления одинаково

хороши и одинаково плохи. Это может совсем отбить ему охоту двигаться, и он просто останется на месте.

Это словесное описание ситуации можно заменить строгой математикой. Вот что дает математика: ускорение центра масс (например, при переходе из состояния покоя в состояние движения) несовместимо с допущением, что законы движения атома не зависят от положения его центра масс. Если сначала центр масс атома покоился в точке A, а затем начал двигаться, то впоследствии он пройдет через другую точку B. В точке A центр масс скорости не имеет. А в точке B он должен иметь скорость. Таким образом, вопреки принципу инвариантности состояние движения атома зависит от положения центра масс. Атом может удовлетворить принципу инвариантности только в том случае, если центр масс останется в покое[1]). Неподвижность центра масс в свою очередь требует, чтобы входящие в состав атома две частицы имели равные по величине и противоположно направленные импульсы. Наличие постоянного баланса двух импульсов означает, что их сумма, т. е. полный импульс, остается постоянным.

Таким образом, эти рассуждения ведут нас от принципа симметрии к закону сохранения, минуя законы движения Ньютона. История показала, что мы имеем здесь дело с более глубоким и более красивым подходом к законам сохранения. Хотя теория относительности и квантовая механика внесли коррективы в законы движения Ньютона, непосредственная связь симметрии пространства с сохранением импульса осталась неизменной или даже усилилась благодаря этим современным теориям. Закон сохранения импульса остается одним из краеугольных камней современной физики. Мы должны представлять себе, что нарушение закона сохранения импульса означало бы неоднородность пространства. Это не исключается, но такое открытие имело бы далеко идущие последствия для наших представлений о строении Вселенной.

[1]) Если первоначально центр масс атома двигался, то, согласно принципу инвариантности, он должен продолжать двигаться с постоянной скоростью.

Возвращаясь, наконец, к книге, лежащей на столе, мы хотели бы подчеркнуть, что неподвижность книги (макроскопического тела), на которую ничто не воздействует, по крайней мере служит веским указанием, что и в макромире справедлив закон сохранения импульса. С точки зрения микромира книга представляет собой собрание огромного количества атомов, находящихся в движении. Но непрестанное микроскопическое движение никогда не дает о себе знать самопроизвольным перемещением всей книги в целом. Это происходит только благодаря закону сохранения импульса, который требует, чтобы каждый раз, когда один из атомов изменит свой импульс (а это происходит непрерывно), другой или несколько других атомов точно компенсировали бы это изменение своими импульсами.

С помощью аналогичных примеров можно установить связь между законом сохранения момента количества движения и изотропией пространства. Стрелка компаса, которую удерживали в направлении на восток, а затем освободили, под действием магнитного поля Земли повернется на север. Однако если ту же самую стрелку компаса поместить в пустое пространство, достаточно удаленное от всех внешних воздействий, и установить в определенном направлении, то стрелка будет все время показывать в этом направлении. Поворот в одном или другом направлении означал бы наличие неоднородности[1]) пространства. Если мы считаем однородность пространства фундаментальным принципом симметрии, то можно сделать вывод, что полный момент количества движения всех атомов, входящих в состав стрелки, должен оставаться постоянным. В противном случае внутреннее движение в стрелке могло бы явиться причиной самопроизвольного вращения стрелки как целого и ее движение нарушило бы принцип симметрии.

[1]) Строго говоря, закон сохранения импульса покоится на *однородности* пространства (равноправии места), а закон сохранения момента количества движения покоится на *изотропии* пространства (равноправии направлений). Это различие несущественно для наших целей, и вполне можно представить себе пространство просто везде одинаковым, т. е. однородным и изотропным.

Закон сохранения энергии связан с однородностью времени; к сожалению, эту связь нельзя наглядно продемонстрировать. Таким образом, все три закона сохранения энергии, импульса и момента количества движения объясняются симметрией пространства-времени. Конечно, теория относительности показала, что все эти три закона есть не что иное, как части единого общего закона сохранения в четырехмерном мире.

До сих пор лишь один из трех законов сохранения, управляющих внутренними свойствами частиц, нашел объяснение в принципе симметрии. Это закон сохранения электрического заряда. (Напомним, однако, что пока остается непонятным *квантование* заряда.) Лежащий в основе закона сохранения заряда принцип симметрии оказывается более тонким, нежели симметрия пространства-времени, на которой покоятся законы сохранения величин, являющихся свойством движения. Современная формулировка этого принципа симметрии связана с математическим аппаратом квантовой механики (с равным основанием этот принцип может быть также получен из теории электромагнетизма). Тем не менее это столь внушительная демонстрация мощи принципов симметрии, что мы должны попытаться, хотя бы грубо, охарактеризовать современное представление об этой симметрии.

Классическая физика в основном имела дело с непосредственно измеряемыми величинами, которые обычно называют *наблюдаемыми*. Сила, масса, скорость и почти все прочие понятия, входящие в классические законы, сами по себе наблюдаемы. Однако в уравнения квантовой механики входят величины, не являющиеся сами по себе наблюдаемыми. Из этих величин, удаляясь всего на один шаг от физической реальности, строят наблюдаемые величины. Одной из ненаблюдаемых величин является волновая функция. Она характеризует вероятность того, что электрон находится, скажем, в определенной точке атома водорода, хотя сама по себе эта функция — не вероятность и ни какая-либо иная измеряемая величина. Введем теперь понятие симметрии. Любое изменение ненаблюдаемой величины, не сопровождающееся изменением наблюдаемой, должно оставлять неизмен-

ными и все законы природы. После тщательного размышления это утверждение кажется столь очевидным, что трудно понять, как вообще оно может иметь какие-либо важные следствия. Конечно же, должна существовать возможность каких-то изменений ненаблюдаемых величин, не сопровождающихся изменением наблюдаемых. Но вспомним, сколь важными оказались свойства пустого пространства. В равной степени важны и свойства ненаблюдаемых величин, таких, как волновые функции.

Само по себе пространство можно считать ненаблюдаемым. Однородность пространства означает, что никакими экспериментальными средствами невозможно установить абсолютное положение в пространстве. Эксперимент, выполненный в одном месте, даст идентичный результат с аналогичным экспериментом, выполненным в другом месте. Любые изменения в ненаблюдаемом пространстве (например, перемещение приборов с одного места на другое) должны оставлять неизменными законы природы и наблюдаемые результаты экспериментов. Как мы только что видели, этот принцип симметрии или требование инвариантности лежит в основе закона сохранения импульса.

Если аналогичный принцип симметрии применить к ненаблюдаемой волновой функции электрона, то мы придем к закону сохранения электрического заряда. Наоборот, если бы электрический заряд не сохранялся, характер уравнений механики зависел бы от ненаблюдаемых величин, т. е. ситуация отличалась бы от положения дел с нашими принципами симметрии. Аналогичное утверждение применительно к однородности пространства звучало бы так: если бы импульс не сохранялся, законы механики зависели бы от абсолютного положения в пространстве, и эта зависимость противоречила бы предполагаемой симметрии пространства.

К сожалению, мы не можем дать более полного объяснения закону сохранения электрического заряда, не прибегая к математике. Можно ожидать, хотя это пока не подтвердилось, что в основе законов сохранения других зарядов — электронного и μ-мезонного (лептонных), а также барионного — лежат пока еще неизвестные, неуловимые свойства симметрии при-

роды. Абсолютный запрет, наложенный на распад протона и удерживающий в вечном заточении огромную внутреннюю энергию, сохраняя ей форму массы, не может быть случайным. Однако пока причины этого еще остаются скрытыми от нас.

Ответы

Превращения, перечисленные на стр. 136, *нарушают* следующие законы сохранения:

1. Энергии; μ-мезонного заряда (μ^+-античастица).
2. Электрического заряда.
3. Момента количества движения; барионного заряда.
4. Энергии; импульса; электрического заряда; μ-мезонного заряда; барионного заряда.
5. Момента количества движения; барионного заряда; μ-мезонного заряда; электронного заряда.
6. Момента количества движения; электронного заряда.
7. Момента количества движения; барионного заряда.
8. Момента количества движения; μ-мезонного заряда.
9. Электрического заряда. (А почему удовлетворяется закон сохранения момента количества движения?)

ГЛАВА
ПЯТАЯ

Фотоны и нейтрино

Одну из частиц, лишенных массы, фотон, мы видим ежедневно. Другие две из известных частиц, не имеющих массы, нейтрино, удалось «увидеть» только благодаря заботам физиков и с помощью чрезвычайно сложных устройств. Четвертая частица, не имеющая массы, гравитон, пока существует только в теории. Ее никогда еще не наблюдали, и, по-видимому, особых надежд на то, что ее смогут обнаружить в ближайшем будущем, нет.

Лишенные массы частицы сами по себе очень привлекательны и имеют особое значение. В этой главе мы расскажем об известных частицах — фотоне и нейтрино, — добавив в конце несколько слов о том, почему так трудно обнаружить гравитон.

Величина массы и электрического заряда вполне однозначно характеризует любую частицу, обладающую массой. «Отрицательная частица с массой $9 \cdot 10^{-28}$ *г*» может соответствовать только электрону. «Нейтральная частица с массой $1,7 \cdot 10^{-24}$ *г*» может быть только ней-

троном. Но если мы говорим «лишенная массы нейтральная частица», то речь может идти и о фотоне, и о нейтрино, и о гравитоне. Даже бегло взглянув на табл. 1, можно обнаружить различие между этими частицами. Фотон имеет спин (врожденный момент количества движения), равный 1, оба нейтрино имеют спины, равные $1/2$, а спин гравитона, согласно предсказаниям теории, должен быть равен 2. Кроме того, нейтрино несут либо электронный, либо μ-мезонный заряд, которого у других частиц нет. Еще более заметно различие в способе рождения, поглощения и взаимодействия этих частиц с другими частицами.

Лишенные массы частицы можно было бы описать, сказав, что это самые «волнообразные» частицы, так как их нельзя представлять себе в виде обычных частиц. Не помогает и попытка распространить наши макроскопические представления о частице на случай исчезающе малой массы, так как в этом случае мы приходим к выводу: нет массы — нет частицы. Все несчастье в том, что лишенные массы частицы «существенно» релятивистские. Их движение нельзя замедлить, так как они всегда движутся с одной и той же фиксированной скоростью — скоростью света, и они не могут быть локализованы. Наше воображение не приспособлено к восприятию подобных вещей, поскольку весь человеческий опыт сосредоточен в нерелятивистской области. Ведь мы имеем дело с более медленными движениями по сравнению со скоростью света. Более того, согласно теории относительности, при скорости, равной скорости света, частицы без массы будут иметь энергию, импульс и момент количества движения (спин).

Как уже отмечалось ранее, скорость света, вообще говоря, не имеет ничего общего со светом. На самом деле это естественный предел скорости во Вселенной, достижимый *любой* частицей, лишенной массы, в том числе и фотоном. Этот предел был назван скоростью света потому, что световые фотоны[1]) оказались един-

[1]) Под «светом» понимается любое электромагнитное излучение (например, радарное), а не только излучение, видимое человеческим глазом. Скорость света измерена очень точно. Она равна $2{,}99793 \cdot 10^{10}$ *см/сек.*

ственными лишенными массы частицами, скорость которых была точно измерена.

Кроме наличия общей скорости, лишенные массы частицы оказываются все до единой стабильными. Самопроизвольный распад этих частиц запрещен законом сохранения энергии: массы частиц-продуктов должны быть меньше массы родительской частицы. Если родительская частица лишена массы, то, очевидно, для нее не существует более легких продуктов и ее распад запрещен законом сохранения энергии. Стабильность частиц, не имеющих массы, можно продемонстрировать также с помощью совсем других аргументов, опять-таки относящихся к своеобразным особенностям движения при высокой скорости. Теория относительности предсказывает, что масштаб времени, так сказать истинный ритм процессов в природе, замедляется для частиц, движущихся с большими скоростями. В конце главы третьей мы говорили о влиянии этого замедления хода времени на время жизни π-мезонов. Быстрые π-мезоны живут дольше, нежели медленные, и чем ближе их скорость к скорости света, тем дольше их жизнь. Если бы удалось заставить их двигаться точно со скоростью света, то эти частицы жили бы вечно. Лишенные массы частицы, движущиеся со скоростью света, воистину бессмертны. Для них время перестало существовать. Даже если бы их распад не нарушал законов сохранения, они все равно жили бы вечно, так как для них «вечно» означает отсутствие времени. В полной гармонии со Вселенной фотон никогда не стареет. Можно было бы сказать, что фотон движется вместе со временем.

Стабильность частицы не означает, что ее нельзя заставить исчезнуть. Электрон стабилен, т. е. будучи предоставлен самому себе, он никогда не исчезает самопроизвольно. Но при встрече с позитроном обе частицы исчезнут, оставив после себя «облако» фотонов. В пустом пространстве фотон и нейтрино равным образом жили бы вечно, однако, взаимодействуя с веществом, они могут исчезать. Фотон делает это с легкостью, а нейтрино — очень редко.

Несмотря на свою специфику, лишенные массы частицы, безусловно, принадлежат к семейству частиц и в большей степени похожи на частицы, имеющие

массы, нежели отличны от них. Все элементарные частицы обладают особенностями, выходящими за рамки здравого смысла, а частицам, лишенным массы, эти особенности просто присущи в наибольшей мере. Например, электрон никогда нельзя привести в состояние полного покоя, так как это подразумевало бы в соответствии с принципом неопределенности полную неопределенность его местоположения. С фотоном дело обстоит еще хуже: он вообще не поддается замедлению. Электрон можно приближенно локализовать в небольшой области пространства, но из-за наличия волновых свойств он не может быть локализован в точке. Фотон не поддается даже приближенной локализации. Однако, подобно другим частицам, фотоны и нейтрино могут рождаться и аннигилировать, они обладают волновыми свойствами, переносят энергию, импульс и момент количества движения, а также подчиняются вероятностным законам.

По-видимому, необходимым условием отсутствия у частицы массы является отсутствие электрического заряда. Каждая заряженная частица обладает массой, хотя не каждая нейтральная частица лишена массы. Существует теоретическое объяснение (довольно формальное по своему характеру) причин отсутствия массы у фотонов и нейтрино, но почему у других частиц имеются те или иные массы и почему среди лишенных массы частиц нет других экземпляров, пока остается загадкой.

Фотон

Интерес к природе света заставляет нас обратиться к истории вопроса, которая, без сомнения, насчитывает столько лет, сколько и любая другая научная проблема, и, вероятно, является одной из самых благодарных задач, за которые когда-либо брались ученые. Изучение света органически слилось со всей историей современной физики, начиная с XVII века и по сей день. Оно тесно связано с развитием электромагнетизма, теории относительности, квантовой механики, а также прикладной оптики и с многочисленными открытиями в области математики. В современный

период оно связано с такими открытиями, как радар и инфракрасная фотография. Начиная с измерения скорости света Оле Рёмером, наблюдавшим спутники Юпитера (1675 г.), и до новейших измерений врожденного магнетизма μ-мезона (1961 г.), изучение света проходило параллельно с общей историей развития физики, форпосты которой за эти 300 лет переместились от изучения Солнечной системы к элементарным частицам. (Какое отношение магнетизм имеет к свету — будет видно из дальнейшего.) И эта увлекательная история еще не окончена, ибо, несмотря на значительное количество данных о природе света, остается несколько известных нам нерешенных вопросов (и, без сомнения, неожиданных загадок).

Тот факт, что свет распространяется с определенной, хотя и огромной, но не бесконечно большой скоростью, стал известен с момента измерений, проведенных Рёмером, и впоследствии эта скорость была измерена с огромной точностью. К началу XVIII века были установлены важные свойства света. Было известно, что белый свет состоит из смеси цветов и что при переходе из одной среды в другую свет испытывает преломление, причем отклонение зависит от цвета.

Скорость света в пустом пространстве оказалась одной и той же для всех цветов (в противном случае спутники Юпитера при появлении из-за планеты казались бы одного цвета, а позднее — другого цвета или белыми). Было известно, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно, что он переносит энергию. Кроме того, было известно особое явление, названное двойным лучепреломлением: попадая в некоторые кристаллы, свет сразу преломлялся дважды, расщепляясь на два отдельных луча.

Несмотря на эти данные и еще больший материал, накопленный в XVIII веке, природа света оставалась загадочной еще целое столетие. Надо было решить фундаментальный вопрос: состоит ли свет из частиц или он представляет собой волновой процесс? И когда начало XIX века ознаменовалось триумфом волновой теории, поверженные защитники корпускулярных представлений вряд ли могли вообразить, что спустя еще столетие после всего, что произошло, окажется, что

свет состоит из частиц, и современное решение спора будет гласить: свет — это и волны, и частицы.

Если принять, что свет распространяется в пустом пространстве с постоянной скоростью вдоль прямой, перенося энергию с места на место, то вполне естественно прежде всего было предположить, что свет должен представлять собой поток частиц. Обычно считается, что эту точку зрения защищал Ньютон, хотя в действительности он представлял себе, что имеющихся доказательств недостаточно, чтобы решить вопрос о справедливости той или иной гипотезы о природе света. Корпускулярная интерпретация казалась ему простейшей гипотезой, совместимой с известными фактами. Преломление света при переходе из одной среды в другую можно объяснить, предположив, что частицы света ускоряются в более плотной среде. Двойное лучепреломление оставалось необъясненным, но и волновая теория, казалось, не могла объяснить его. Однако корпускулярная гипотеза не смогла решить ряда проблем. Так как еще никто не знал, что могут существовать частицы, лишенные массы, то казалось странным, что предмет, испускающий свет, по-видимому, не теряет веса, а предмет, поглощающий свет, не становится тяжелее. Исходя из корпускулярных представлений, трудно было бы, кроме того, объяснить постоянство скорости света. Можно было бы предположить, что частицы различного цвета движутся с различной скоростью или же что более интенсивный источник света сообщает световым корпускулам бо́льшую скорость.

Волновая теория прекрасно справилась с обеими этими трудностями. Волна может переносить энергию с места на место, не передавая при этом массы, и для волны характерна постоянная скорость распространения независимо от ее интенсивности или длины волны. Например, скорость звука не зависит от интенсивности или высоты тона. Легко объяснить преломление волн, но при этом требуется предположить, что волна распространяется в более плотной среде не быстрее, а медленнее. (В середине XIX века эксперимент решил этот спор в пользу более медленного распространения и явился дополнительной поддержкой волновых представлений, ко-

торые к тому времени получили весьма широкое признание.)

Трудность волновых представлений заключалась, по-видимому, в том, что они требовали существования всепроникающей субстанции, которая заполняла бы все пространство и могла передавать световые колебания. Придуманный для этой цели эфир должен был представлять собой чрезвычайно эфемерную субстанцию, ибо в отличие от воды и воздуха он должен был быть полностью прозрачным, лишенным вязкости и не оказывать сопротивления материальным предметам, движущимся через него. (В противном случае Земля замедлялась бы и приближалась бы к Солнцу по спирали.) Несмотря на эти неправдоподобные свойства, в существование эфира верило большинство ученых. Эфир казался необходимым для объяснения передачи действия гравитационных и электрических сил через пустое пространство. Представление о действии на расстоянии без участия промежуточного агента большинству людей казалось еще менее приемлемым, нежели идея загадочного эфира.

Ряд экспериментов, выполненных на протяжении двух первых десятилетий XIX века, совершенно независимо от аргументов и рассуждений, касающихся эфира, дал столь убедительное подтверждение волновых представлений, что не могло оставаться каких-либо сомнений в волновой природе света. На самом деле рьяные приверженцы корпускулярной теории света предлагали вымученные и неправдоподобные объяснения этих явлений. Однако световые волны позволили объяснить их столь просто и изящно, что вряд ли можно было бы рассчитывать, что волновые представления уступят место «правильному» объяснению. Здесь важно отметить, что опыты, вылившиеся в триумф волновой теории, справедливы сегодня, как и 150 лет назад. Хотя наши знания теперь более глубокие и позволяют нам утверждать, что свет, несмотря ни на что, состоит из частиц-фотонов, старые опыты не подлежат переоценке. Их можно повторить и сегодня, но будет получен прежний результат, который объясняется на основе волн. Мы должны принять новые доказательства корпускулярных свойств света,

сохраняя старые доказательства его волновой природы. К счастью, квантовая механика смогла объяснить, каким образом свет и все частицы совмещают и те, и другие свойства.

Решающие доказательства волновой природы света лежат в явлениях дифракции и интерференции (определение и обсуждение содержатся в главе третьей). Волна, минуя препятствие, не оставляет строго резкой тени, а немного отклоняется в область тени, создавая у нее слегка размытый край. В этом заключается явление *дифракции*. Две волны, встречающиеся в одной и той же точке, могут усиливать друг друга, если гребень или впадина одной совпадает соответственно с гребнем или впадиной другой, или же могут взаимно уничтожать друг друга, если гребень одной будет приходиться на впадину другой. Это явление *интерференции*. Небольшое размышление показывает, что каждое из этих явлений было бы весьма затруднительно объяснить на языке световых корпускул. Конечно, волновая теория дает нечто большее, нежели качественное объяснение природы этих явлений. Она обеспечивает количественную теорию дифракции и интерференции, которая точно согласуется с экспериментальными данными. Например, теория предсказывает точный закон плавного изменения интенсивности в области размытого края тени, как в интерференционной картине от двух источников света (см. фиг. 12).

Те же явления, с помощью которых было доказано существование световых волн, обеспечили средства для измерения длины волны; вскоре стало известно, что цвета различаются длиной световой волны. Видимый свет занимает примерно одну октаву[1]) длин волн, от коротковолнового фиолетового цвета ($3{,}5 \cdot 10^{-5}$ *см*) до длинноволнового красного ($7 \cdot 10^{-5}$ *см*). Хотя эти длины волн малы, они все же в несколько тысяч раз превосходят размеры атома, которые составляют примерно 10^{-8} *см*.

[1]) Октава соответствует двукратному изменению длины волны и частоты. Нота «до» первой октавы, к примеру, соответствует 256 колебаниям в 1 *сек*, а «до» второй октавы соответствует 512 колебаниям в 1 *сек*, а «до» следующей октавы — уже 1024 колебаниям в 1 *сек*.

Помимо длины волны, волна характеризуется частотой, т. е. числом колебаний в 1 *сек*. Световые волны колеблются исключительно быстро, они совершают более 10^{14} колебаний в 1 *сек*. Самому высокому тону, который способно различить человеческое ухо, соответствует примерно 10^4 колебаний в 1 *сек*. Радиоволны колеблются с частотой примерно 10^6 (1 млн.) колебаний в 1 *сек* в полосе обычного вещания, примерно до 10^9 (1 млрд.) колебаний в 1 *сек* в так называемой полосе СВЧ (сверхвысокие частоты). Колебания света совершаются примерно в миллион раз чаще, чем колебания СВЧ, а длина волны оказывается в миллион раз короче. Частота связана с длиной волны чрезвычайно простой формулой

$$\lambda f = v,$$

где λ — длина волны (например, в *см*), f — частота (например, в числе колебаний в 1 *сек*), v — скорость распространения волны (например, в *см/сек*). Эта формула применима для любых волн. Так, для музыкального тона «ля» $f=440$ колебаний в 1 *сек*. Скорость звука в воздухе составляет $3 \cdot 10^4$ *см/сек*, так что длина волны в воздухе ноты «ля» равна его скорости распространения v, деленной на частоту f, т. е. примерно 68 *см*. Мы могли бы воспользоваться этой же формулой и для оценки частоты зеленого света с длиной волны $5 \cdot 10^{-5}$ *см*. Его скорость $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*, деленная на эту длину волны, даст частоту $6 \cdot 10^{14}$ колебаний в 1 *сек*.

Следующий значительный шаг в понимании природы света был сделан как раз 100 лет назад, примерно в 1860 г., главным образом благодаря работе британского ученого Джеймса Максвелла. Произошло это не в результате непосредственного изучения света, а благодаря косвенным данным, полученным при исследовании электричества и магнетизма. Тесную связь электрических и магнитных явлений полностью оценили лишь несколько десятилетий до этого, и Максвелл попытался соединить все, что было известно об электричестве и магнетизме, воедино с помощью нескольких простых уравнений, которые могли послужить основой общей теории электромагнетизма.

Одно из самых больших научных достижений XIX столетия (а быть может, всех времен) было связано с успешной попыткой Максвелла записать простую систему уравнений, которая не только охватила все известные электрические и магнитные явления, но и в качестве неожиданного сюрприза объяснила природу света. Максвелл обнаружил, что, как предсказывают его уравнения, комбинированное электрическое и магнитное возмущения (поле) может распространяться в виде волн в пустом пространстве.

Интересная особенность электричества состоит в различии его поведения в зависимости от того, движутся или покоятся заряды. Рассмотрим, к примеру, лабораторию, содержащую ряд электрически заряженных предметов и магнитов, которые покоятся в разных местах. Заряженные предметы воздействуют друг на друга, а магниты тоже воздействуют друг на друга, но между электричеством и магнетизмом никакого взаимодействия нет. Это происходит потому, что существуют два различных «поля», или возмущения пространства — электрическое поле и магнитное поле. Опыты с покоящимися зарядами и магнитами были успешно объяснены в предположении, что покоящиеся заряды порождают только электрическое поле и реагируют только на наличие электрического поля. Соответственно покоящиеся магниты порождают только магнитное поле и реагируют только на наличие магнитного поля. Подобно пересекающимся лучам двух прожекторов, оба постоянных поля существуют в пространстве, не испытывая взаимодействия.

Однако положение дел резко меняется, если в игру вступают движущиеся заряды или магниты. Движущийся заряд влияет на магнит, а движущийся магнит оказывает воздействие на заряд. И заряд, и магнит, двигаясь, порождают как электрическое, так и магнитное поле. Это комбинированное поле называется электромагнитным. Связь между электричеством и магнетизмом, обусловленная движением, была обнаружена и исследована в период 1800—1840 гг. Именно наряду со старыми статическими законами эта связь и была элегантно описана уравнениями Максвелла, которые показали, что электриче-

ство и магнетизм — это просто две стороны одного и того же явления.

Сюрприз, преподнесенный уравнениями Максвелла, состоял в установлении связи электрических и магнитных явлений, возникающей в результате движения или изменения. Его уравнения предсказывали, что при определенных условиях электромагнитные поля будут распространяться через пространство. Независимо от того, созданы ли они движущимися зарядами или магнитами, эти поля, возникнув, будут самостоятельно распространяться в виде электромагнитных волн. Подобные решения уравнений Максвелла в виде распространяющихся волн существуют только при наличии непрерывно колеблющихся электрических и магнитных полей одинаковой интенсивности. При этих условиях электромагнитная волна должна распространяться в пространстве, причем скорость распространения была вычислена Максвеллом, исходя только из известных законов электричества и магнетизма. Предсказанная скорость равнялась $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*, т. е. точно (в пределах ошибок опыта) совпадала с известной скоростью света. Максвеллу оставалось сделать еще один шаг и предположить, что свет есть не что иное, как электромагнитные волны.

Самого по себе успешного предсказания величины скорости света было бы практически достаточно, чтобы это предположение сразу же завоевало всеобщее признание. Однако его справедливость была доказана и иными путями. Уже наметилась некоторая связь электрических явлений и света и имелись веские указания на то, что излучающее свет вещество имеет электрическую природу. Это означало, что внутри каждого атома имеется электрический заряд. Согласно предсказаниям теории Максвелла, свет должен был представлять собой не продольные, а поперечные колебания. Простейшим примером поперечных колебаний могут служить волны на воде. Движение *воды* происходит вверх и вниз, перпендикулярно направлению распространения *волны*, которое происходит горизонтально. Проходящая волна качает пловца то вверх, то вниз. Но звуковые волны, или ударные волны, распространяющиеся в среде, а не по ее поверхности, продольные. Колебания среды происходят в

том же направлении, что и распространение волны. Человек, попавший в ударную волну от взрыва, сначала будет отброшен в сторону от места взрыва, а затем его потащит назад; его как бы заставят колебаться вдоль направления распространения волны. Первоначально сторонники волновой теории света естественно считали, что свет проходит через эфир совершенно так же, как распространяется звук в воздухе, т. е. путем продольных колебаний. Однако ряд эффектов, включая двойное лучепреломление, показал, что свет должен представлять собой поперечные волны. Уравнения теории Максвелла требуют, чтобы электрические и магнитные поля в световой волне колебались перпендикулярно направлению распространения (и друг другу). Если волна распространяется к северу, то электрическое поле в ней могло бы колебаться вверх и вниз, а магнитное поле — на запад и на восток. Волна может содержать смесь многочисленных направлений, в которых происходят колебания, однако все они будут перпендикулярны направлению распространения волны. Если волна такого типа попадает в кристалл, то не удивительно, что она расщепляется на два луча. Скорость волны внутри кристалла может зависеть (и иногда действительно зависит) от направления колебаний электрического поля, в результате чего пучок частично преломляется под одним углом, а частично — под другим. Почему не может быть более двух лучей — не имеет принципиального значения, и мы не будем пытаться здесь объяснять это. В случае продольных волн существует лишь одно-единственное направление колебаний; следовательно, в этом случае нельзя объяснить двойное лучепреломление.

Рассмотрим соотношение $\lambda f = c$ (через c обычно обозначают скорость света). Максвелл обнаружил, что должен существовать широкий электромагнитный спектр, простирающийся от произвольно малых длин волн (и соответственно высоких частот) до произвольно больших длин волн (и соответственно малых частот). В этом безграничном диапазоне единственная октава, принадлежащая видимой области, казалась каплей в море. Однако одно дело знать теоретически о существовании этого неограниченного спектра, а

другое — создавать электромагнитное излучение на практике. Для возникновения электромагнитного излучения необходимо, чтобы происходило колебание зарядов, но медленное колебание зарядов типа раскачивания вручную заряженного предмета крайней неэффективно. К счастью, атомы солидарны в своем «желании» заставить заряды быстро колебаться, так как электроны в атомах находятся в непрерывном колебательном движении с частотой 10^{14} колебаний в 1 *сек* и больше. Их легко заставить испустить свет. Как нам теперь известно, ядра испускают еще более высокочастотное электромагнитное излучение, известное под названием гамма-излучения. Это происходит потому, что заряженные протоны колеблются внутри ядер с еще более высокой частотой, примерно 10^{20} колебаний в 1 *сек.*

Во времена Максвелла создать высокочастотные колебания зарядов не удавалось, и так длилось до 80-х годов прошлого века, пока Дэвиду Хьюзу в Англии и Генриху Герцу в Германии не посчастливилось осуществить «искусственную» генерацию электромагнитного излучения, т. е. вызвать не естественные колебания в атомах, а созданные руками человека колебания зарядов. И Хьюз, и Герц использовали колебания заряда, происходящие при искровом разряде, частота которых составляла «всего» от миллиона до ста миллионов (10^6—10^8) колебаний в 1 *сек.* Тем самым они подтвердили предсказанные Максвеллом свойства электромагнитного излучения и, следовательно, дали еще одно косвенное доказательство электромагнитной природы света.

К концу XIX века общая теория электричества, магнетизма, радиоволн и света, по-видимому, приобрела уже законченный и изящный вид. Существование эфира и его способность совершать поперечные колебания были признаны физиками, несмотря на отсутствие каких-либо прямых доказательств. С несомненностью была установлена волновая природа света и прочих форм электромагнитного излучения. И все же остался ряд сюрпризов. В первые годы нового века на сцену выступил фотон, а эфир был низложен.

Ниспровержение эфира, недвусмысленно совершенное теорией относительности, произвело целый переворот в представлении людей о свойствах пустого пространства. Хотя оба события произошли примерно в одно и то же время, этот переворот не был непосредственно связан с открытием фотона, и мы отложим дальнейший рассказ об эфире до главы седьмой.

Фотон был «обнаружен» двумя теоретиками: в Германии Максом Планком в 1899 г. и в Швейцарии Альбертом Эйнштейном в 1905 г. Эти ученые показали, что если предположить, что свет имеет характер не непрерывных волн, а дискретных порций энергии, то это позволяет объяснить ряд странных экспериментов. Хотя Планк первым пришел к этому открытию, понять его результат значительно труднее, чем то, что сделал Эйнштейн. Планк рассмотрел распределение энергии в закрытом ящике, заключающем внутри себя электромагнитное излучение. Это излучение переносит энергию, непрерывно обмениваясь ею с атомами стенок ящика, и проблема, к решению которой приступил Планк, состояла в том, чтобы объяснить, каким образом распределяется вся эта энергия. Часть энергии сосредоточена в стенках, часть переносится излучением и распределяется между волнами с различными частотами. Речь идет о сложной системе, содержащей большое число атомов и разнообразный набор длин волн. Планк пришел к выводу, что он может объяснить распределение энергии между различными частями системы, только предположив, что энергия переносится волнами лишь в виде порции вполне определенной величины, которая дается формулой

$$E = hf;$$

здесь E — энергия, заключенная в такой порции излучения, или, как мы говорим теперь, энергия фотона, а f — частота излучения. Постоянная h, входящая в эту формулу, представляет собой множитель пропорциональности, установивший связь между частотой световой волны и минимальной порцией энергии, которую может нести эта световая волна (связь, о которой раньше не подозревали). Эта квантовая постоянная, с которой мы уже встречались при обсуж-

дении спина, названа в честь открывшего ее ученого постоянной Планка.

По поводу этой формулы следует сделать два замечания. Во-первых, отметим пропорциональность энергии частоте. Это означает, что высокочастотный фотон ядерного γ-излучения несет гораздо большую энергию, нежели низкочастотный фотон радиоизлучения (в действительности примерно в 10^{14} раз большую). Отдельный γ-квант обладает столь большой энергией, что легко поддается регистрации сам по себе, тогда как энергия отдельного фотона, излучаемого антенной широковещательной радиостанции, так мала, что зарегистрировать его невозможно. Обнаружить удается лишь суммарный эффект бесчисленной армии радиофотонов, а когда многочисленные фотоны действуют сообща, их индивидуальные корпускулярные свойства подавляются общим волновым поведением. Радиоинженеру никогда не приходится иметь дело с отдельными фотонами, и он всегда мыслит масштабами волн. С другой стороны, ядерщику γ-кванты представляются прежде всего как частицы, и он меньше сталкивается с их волновыми свойствами.

Второе замечание связано с тем значением, которое имеет величина постоянной Планка h. Если бы величина h оказалась много меньшей, то количество энергии, переносимое одним фотоном, также было бы значительно меньшим и квантовые или корпускулярные свойства света были бы менее заметны. Если вообразить, что h обратилась в нуль, то в этом случае вообще не было бы фотонов и свет вновь обрел бы волновые свойства. С другой стороны, если бы h стала значительно больше, то более заметными оказались бы и квантовые свойства света. Отдельные фотоны несли бы такую большую энергию, что их можно было бы отчетливо наблюдать глазом в виде световой вспышки. (Это чистая фантазия, ибо если бы h *действительно* была больше, то атомы имели бы бóльшие размеры и сам человек тоже. Наше обсуждение рассчитано лишь на то, чтобы разъяснить значение постоянной h, величину которой, конечно, нельзя изменять.) Роль постоянной Планка состоит в том, что она определяет масштаб квантовых явлений. Мы живем в мире, подчиняющемся классическим

законам, поскольку величины энергии, с которыми мы имеем дело в повседневной практике (энергия, связанная с поднятием руки или чтением страницы), чрезвычайно велики по сравнению с энергией отдельного светового фотона.

Эйнштейн обнаружил, что фотон необходим для объяснения иного и гораздо более простого явления, нежели рассматривал Планк. Планк имел дело с системой, которая содержала бесчисленное число атомов и фотонов. Эйнштейн рассмотрел эксперимент, в котором происходит элементарный процесс поглощения отдельного фотона. Его работа по фотоэффекту, опубликованная в 1905 г., вновь привела к уравнению Планка $E=hf$ и превратила фотон, по-видимому, в неизбежную необходимость.

Несколькими годами раньше было замечено, что при освещении поверхности некоторых металлов ультрафиолетовым светом (невидимый свет с частотой, несколько большей, и длиной волны, несколько меньшей, чем у фиолетового края видимой области) с нее вылетают электроны. Это явление, названное фотоэлектрическим эффектом, получило качественное объяснение в рамках максвелловской волновой теории света. Однако эта теория не смогла дать полного описания всех количественных сторон процесса. Согласно волновой теории, падающее на поверхность электромагнитное излучение приводит в движение электроны, расположенные вблизи поверхности, причем некоторые из них начинают двигаться столь быстро, что могут вылетать с поверхности.

Волновая теория дала два основных вывода, и оба эти предсказания противоречили фактам. Во-первых, более интенсивное излучение должно было сильнее раскачивать электроны и выбивать их с большей энергией. Однако энергия вылетающих электронов при увеличении интенсивности света не менялась. Единственное изменение состояло в том, что вылетало большее число электронов. Во-вторых, согласно волновым представлениям, энергия электрона не должна непосредственно зависеть от частоты света при условии, что на поверхность падает свет достаточной интенсивности. В действительности же более высокочастотное излучение заставляет электроны вы-

летать с большей энергией даже при уменьшении интенсивности света. Электроны вообще не вылетают, если частота оказывается ниже некоторой определенной. Обычный видимый свет (с частотой более низкой, чем у ультрафиолетового) независимо от его интенсивности не был в состоянии выбивать электроны с поверхности.

Эйнштейн заметил, что корпускулярная теория света может очень просто и красиво объяснить наблюдаемые характеристики фотоэлектрического эффекта. Согласно волновым представлениям, электрон постепенно поглощает энергию волны и может поглотить любое ее количество, как большое, так и малое. Допустим вместо этого, рассуждал Эйнштейн, что энергия падающего света может поглощаться только порциями определенной величины. Электрон либо поглощает весь фотон целиком, либо не поглощает его совсем. Увеличение интенсивности света означает увеличение числа фотонов, но не меняет энергии каждого из них. Большая интенсивность сказывается в большем числе электронов, которые поглощают фотоны, но не увеличивает энергии, приобретаемой каждым из них. Если энергия фотона описывается соотношением Планка

$$E = hf,$$

то энергия, поглощаемая данным электроном, будет зависеть от частоты падающего света, а не от его интенсивности. Вероятность поглощения одним электроном более чем одного фотона исчезающе мала, так как число фотонов значительно меньше числа электронов. Все происходит так, как на бейсбольном поле, где, скажем, несколько тысяч игроков (электроны) бьют несколько десятков мячей (фотоны). Большинство игроков мяча не поймает, и удастся это только некоторым. Вероятность того, что кто-нибудь поймает более одного мяча, конечно, крайне мала. Чтобы сделать аналогию с действительным фотоэлектрическим эффектом еще более тесной, мы должны сказать, что, как только игрок ловит мяч, он приходит в такой восторг (приобретает достаточно энергии), что бежит к ограде и покидает поле. Но шансов на то, что при выходе он перехватит еще один мяч, очень мало. Та-

ким образом, воодушевеление, с которым он покидает поле, определяется энергией, несомой отдельным мячом. Если число летящих мячей (интенсивность света) увеличится, то возрастет и число игроков, покидающих поле, однако энергия, с которой они покидают поле, останется прежней. Если же по каждому мячу будут наноситься более мощные удары лаптой (фотоны с более высокой энергией), каждый из удачливых игроков будет испытывать еще большее ликование и удирать с еще большей энергией. Если бы по мячу били очень слабо (фотоны с низкой частотой), то ни у одного игрока не оказалось бы достаточно энергии, чтобы перескочить через ограду после того, как он поймает мяч. И в этом случае ни один игрок не покинул бы площадку.

Гипотеза фотонов просто объяснила две главные особенности фотоэлектрического эффекта — зависимость числа электронов от интенсивности света и зависимость энергии каждого электрона от частоты света. Волновая теория была совершенно не способна это сделать. В случае фотоэлектрического эффекта мы являемся свидетелями отдельного акта поглощения фотона электроном, события, несравненно более простого, нежели рассматривал Планк. В результате, несмотря на все существующие аргументы в пользу волновой природы света, ничего не оставалось делать, как признать фотон в качестве физической реальности. Из измерений частоты света и энергии электронов можно было определить величину постоянной Планка h и подтвердить правильность соотношения $E=hf$. Фотон присоединился к электрону в качестве полноправной элементарной частицы и принес с собой новую фундаментальную константу h, которой спустя два десятилетия был открыт доступ в законченную квантовую теорию. В работах Планка и Эйнштейна пропорциональность энергии фотона частоте света была произвольно введена физиками для объяснения экспериментальных данных. Соотношение $E=hf$ и в 1905 г. являлось *законом* природы, но вплоть до 1925 г. оно не опиралось на какие-либо фундаментальные общие положения, пока не была создана квантовая механика, которая объяснила поведение всех элементарных частиц, включая и фотон.

А теперь, когда фотон низведен до положения рядовой частицы, будут ли физики проявлять к нему особый интерес, и в чем заключается та особая роль, которую фотон играет в жизни людей? Ответим сначала на второй вопрос. Это нетрудно сделать, поскольку человеческая жизнь немыслима без фотонов. Без фотонов мы бы не видели и вообще нас бы не было, ибо источником почти всей энергии на Земле в конечном счете служат фотоны, приходящие от Солнца. Электротехника включает два аспекта — энергетику и связь. В космическом пространстве основным действующим лицом в обоих случаях служит фотон. Большая часть энергии и информации от одной части Вселенной к другой передается фотонами. Земля постоянно окутана фотонами. Фотоны, приходящие с Солнца, несут с собой энергию, а фотоны, прилетающие от других звезд и других галактик, помимо энергии, приносят нам еще сведения об остальной части Вселенной. Отличительная особенность фотонов заключается в том, что в присутствии вещества они легко рождаются и столь же легко поглощаются, однако в пустом пространстве они могут странствовать вечно. Земля еще окутана частицами — нейтрино, но это обстоятельство не имеет значения, поскольку нейтрино поглощаются с трудом и, как правило, проходят сквозь Землю и ее обитателей так, как если бы на их пути ничего не было. Сравните эту ситуацию со случаем легко поглощающихся фотонов. Взгляните на собственную руку в лучах солнечного света, вы увидите лишь ее наружную поверхность. Фотоны, уцелевшие на протяжении сотен миллионов километров своего пути в пустом пространстве, попали в твердое вещество и погибли на отрезке не более чем в миллионную долю сантиметра. (Отражение от кожи солнечного света, к примеру, в действительности представляет собой поглощение, а затем повторное испускание фотонов.)

На самой Земле фотоны играют не столь важную роль в процессах передачи энергии, однако они остаются основным переносчиком информации. Радиовещание, телевидение, радиолокация, световые сигналы, инфракрасная фотография и рентгеноскопия — все это примеры передачи информации с помощью

фотонов[1]). В США существует Федеральная комиссия связи, которая регулирует «потребность в фотонах». Фотоны служат основным источником сведений о строении атомов (испускающих свет и рентгеновские лучи) и ядер (испускающих еще более высокочастотное γ-излучение). Каждый сорт атомов и ядер может испускать фотоны только с определенной, характерной для них частотой (или энергией), так что спектр испускаемых фотонов служит паспортом, удостоверяющим «личность» атома или ядра. Помимо своего значения для исследовательских целей, это обстоятельство позволяет легко определять состав неизвестного вещества или обнаруживать наличие примесей в почти чистых веществах.

Возникновение и распространение фотонов происходит в соответствии с движением заряженных частиц. Любая частица, обладающая электрическим зарядом, может испускать или поглощать фотоны. Однако как в мире атома, так и в макромире в этих процессах участвуют главным образом электроны — мельчайшие частицы, быстрее всех приходящие в движение. Электрон, находясь в атоме, может перейти в состояние движения с меньшей энергией, испустив при этом фотон, или, поглотив фотон, может перейти в состояние движения с более высокой энергией. Колебательные движения, совершаемые электронами в антенне радиовещательной станции, также служат причиной испускания фотонов. Некоторые из этих фотонов попадают в антенну домашнего радиоприемника и поглощаются электронами, результирующее движение которых в виде электрических сигналов передается в недра радиосхемы. Какой бы процесс не рассматривался, последовательность событий всегда будет одной и той же. Где-то движущаяся заряженная частица испускает фотон. Он может пройти ничтожную долю сантиметра, а может удалиться на миллиарды километров. Но в любом случае он в конце концов встретит другую заряженную частицу, которая может поглотить его, что приведет к соответствующему

[1]) Здесь можно добавить об огромном значении квантовых генераторов света, лазеров, открывающих совершенно фантастические возможности применения фотонов. — *Прим. перев.*

изменению ее движения. Обычно характер движения, приводящего к рождению фотона, и характер движения, возникающего в результате его поглощения, совпадают. Свет, возникающий в результате атомных колебаний, поглощается атомом. Радиофотоны, испущенные антенной, приведут в колебание электроны в другой антенне.

Но есть еще один вопрос, связанный с фотонами, и его следовало бы осветить. Речь идет о той роли, которую играют в природе призрачные фотоны, называемые *виртуальными*. Такие фотоны испускаются и снова поглощаются одной и той же заряженной частицей, даже не вполне избавившись от нее и не покидая ее. Эти «почти-но-не-вполне-фотоны» в настоящее время играют важную роль в развитии науки; мы вернемся к их обсуждению в главе седьмой.

Нейтрино

Электронное нейтрино было «придумано» в 1930 г. Вольфгангом Паули, чтобы спасти законы сохранения. Эта незаметная, маленькая частица, лишенная массы и заряда, спасла от краха три абсолютных закона сохранения. Героизм этого поступка был так значителен, что существование нейтрино для физиков уже не являлось предметом сомнения, хотя этой частице и удавалось избегать прямого знакомства с ними вплоть до 1956 г. Подобно антипротону и антинейтрону (которые были обнаружены в 1955 и 1956 гг.), нейтрино долгое время было только призраком в зоопарке элементарных частиц; оно было необходимо для построения современной физики, но никогда никем не наблюдалось.

После открытия μ-мезона обязанности, возложенные на плечи нейтрино, возросли, так как μ-мезону, как и электрону, требовался партнер — нейтрино. Теперь известно, что существуют нейтрино двух сортов (по крайней мере): одно электронное и одно μ-мезонное. Но поскольку обе эти частицы почти тождественны, мы будем в этой главе называть их просто «нейтрино». Как могло случиться, что эти частицы,

не будучи даже обнаружены, утвердились в качестве неотъемлемой части микромира?

Исторически так сложилось, что существование нейтрино было постулировано, чтобы спасти закон сохранения энергии. Очень скоро нейтрино оказалось также спасителем законов сохранения импульса и момента количества движения. И наконец, оно приняло участие в утверждении законов сохранения электронного и μ-мезонного (лептонных) зарядов.

Если тяжелое радиоактивное ядро испускает α-частицу, то эта частица вылетает с вполне определенной энергией, всегда одной и той же у ядер данного типа. Остающееся при этом дочернее ядро оказывается легче радиоактивного материнского ядра, и эта разность масс, умноженная на квадрат скорости света, представляет собой энергию, в точности равную энергии, уносимой α-частицей (сумме ее собственной и кинетической энергий). Короче говоря, концы сведены с концами; энергия сохраняется. Энергия родительского ядра равна энергии дочернего ядра плюс энергия α-частицы (вспомним, что в энергетическом балансе всегда надо учитывать массу). Аналогичным образом в процессе γ-распада определенное ядро испускает фотон с характерной энергией. Фотон уносит в точности энергию, теряемую ядром[1]). Казалось, что в третьем типе естественной радиоактивности, β-распаде, концы не сходятся с концами. Набор одинаковых β-активных ядер распадается таким образом, что не все ядра испускают β-частицы (электроны) с одной и той же энергией или даже с определенным набором энергий. Вместо этого электроны вылетают в «непрерывном спектре» со всевозможными энергиями от нуля до некоторого максимального значения. Если произошло испускание электрона с максимальной энергией, то эта энергия как раз

[1]) В действительности ядро определенного типа может испускать γ-кванты или α-частицы с различной энергией из-за того, что дочернее ядро может оставаться в состояниях с различными энергиями. Если испускается фотон или α-частица с меньшей энергией, то дочернее ядро остается с энергией, превышающей ее обычную энергию, и оказывается в так называемом возбужденном состоянии. Закон сохранения энергии был проверен для каждой энергии фотона или α-частицы.

соответствует разности энергий родительского и дочернего ядра. Если испускается электрон с меньшей энергией, то концы с концами не сходятся и остается избыток энергии.

Некоторые физики хотели было отказаться от закона сохранения энергии. В конце концов это закон, основанный на эксперименте, утверждали они, и если эксперимент не подтверждает его, то закон следует отвергнуть. Известно, что энергия сохраняется в макромире и в мире атомов, но, возможно, закон сохранения энергии нарушается в ядерных и субъядерных масштабах, подобно тому как теряют свою силу в мире атомов законы классической механики. Если бы это оказалось так, то явление β-распада послужило бы ключом к пониманию свойств более глубоких ступеней природы.

Но Паули предположил вместо этого, что из ядра наряду с электроном могла бы испускаться нейтральная частица, которую не удается зарегистрировать, а избыток энергии распределяется между этой новой частицей (нейтрино) и электроном. Это нововведение сразу смогло объяснить, почему электроны, возникающие при β-распаде, могут уносить любую энергию вплоть до некоторой максимальной. Дело в том, что электроны могут уносить любую часть полной энергии, а то, что остается, приходится на долю нейтрино. Предполагалось, что нейтрино не должно иметь заряда, так как в противном случае электрическое взаимодействие нейтрино сделало бы эту частицу легко наблюдаемой. Более того, это привело бы к несохранению заряда, т. е. пришлось бы платить слишком дорогой ценой за сохранение энергии. Кроме того, предполагалось, что масса нейтрино чрезвычайно мала. В тех случаях, когда электрон уносит почти всю энергию, на долю нейтрино приходится очень небольшая энергия. Если бы нейтрино имело массу, то его энергия не могла бы быть меньше энергии покоя. Точно установить, насколько должна быть мала масса нейтрино, не позволяют лишь ошибки измерений. В настоящее время известно, что масса нейтрино составляет менее одной тысячной массы электрона, и ее почти с полной уверенностью полагают точно равной

нулю. Энрико Ферми назвал эту частицу нейтрино, что в переводе с итальянского означает «маленькая, нейтральная».

Какое же предложение оказалось более радикальным: несохранение энергии или введение новой частицы? Сейчас у нас не должно быть никаких колебаний, поскольку список элементарных частиц разросся настолько, что простое добавление еще одной частицы ничего особенного не изменит. А в 1930 г. гипотеза Паули казалась куда более смелой, нежели сегодня. В то время были известны лишь протон, электрон и фотон. И тем не менее даже тогда отказ от закона сохранения энергии означал более радикальный переворот. С точки зрения эксперимента закон сохранения энергии уже нашел подтверждение в ядерных процессах γ- и α-распадов. Но еще важнее то обстоятельство, что закон сохранения энергии покоился на существовании в природе глубокой и простой симметрии — однородности времени, которая заключалась в том, что все физические эксперименты должны давать одни и те же результаты в разные моменты времени. Отказ от закона сохранения энергии привел бы к гораздо большему потрясению фундаментальных научных представлений, нежели введение новой частицы.

Однако независимо от соображений, основанных на изяществе и простоте законов природы, в решении этого вопроса, как и во всех остальных научных проблемах, последнее слово должно принадлежать эксперименту. Нейтринная гипотеза стала завоевывать признание, поскольку позволила на ее основе создать простую теорию, успешно объясняющую опытные данные β-распада, и поскольку она привела к спасению не только закона сохранения энергии, но и еще нескольких законов сохранения. В 1956 г. наконец было непосредственно обнаружено электронное нейтрино, а в 1962 г. впервые наблюдали μ-мезонное нейтрино и установили, что это совсем иная частица.

Согласно первоначальному предположению Паули, нейтрино должно было существовать внутри ядра, и вместе с электроном, который также должен был

находиться в ядре, оно испускалось при β-распаде[1]. Спустя несколько лет, в 1934 г., Ферми, строя математическую теорию β-распада, частично использовал гипотезу Паули, но ввел от себя чрезвычайно радикальные и важные новшества. Произошедшее тем временем (1932 г.) открытие нейтрона показало, что внутри ядер нет электронов, и не было оснований думать, что с нейтрино дело обстоит иначе. «Допустим, — рассуждал Ферми, — что электрон и антинейтрино образуются лишь в момент вылета из ядра, а нейтрон внутри ядра одновременно превращается в протон». Символически это выглядит так:

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

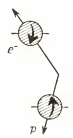
Развитая Ферми теория, помимо сильной поддержки, оказанной нейтринной гипотезе Паули, имела еще особое значение с точки зрения развития современной физики. Это была первая успешная теория, описывающая рождение и гибель частиц вещества. До этого было известно, что только фотоны могут возникать и исчезать. Последующее развитие теории Ферми показало, что процессы гибели и рождения, по-видимому, характерны для *всех* фундаментальных взаимодействий в природе.

Фиг. 20 (стр. 135) иллюстрирует β-распад отдельного свободного нейтрона; на ней изображены направления траекторий и спинов частиц. Антинейтрино на самом деле остается невидимым. В действительности удается наблюдать (например, в камере Вильсона) лишь следы электрона и протона. С гораздо большим трудом можно также наблюдать спины этих частиц.

Теперь нам ясно, каким образом в отсутствие нейтрино нарушались бы четыре фундаментальных закона сохранения. Во-первых, нарушается энергетический баланс. Сумма энергий электрона и протона меньше первоначальной энергии нейтрона (его массы

[1]) Первоначально Паули было необходимо, чтобы нейтрино находилось внутри ядра, для объяснения ряда данных, относящихся к спину ядра. Впоследствии эта обязанность была возложена на нейтрон.

покоя). Нейтрино было изобретено, чтобы заполнить эту брешь. Во-вторых, как видно из фиг. 21, не сохранялся бы импульс. Поскольку нейтрон сначала покоился, его импульс был равен нулю. Чтобы сохранить нулевой импульс, электрон и протон должны были бы разлетаться с одинаковыми по величине и противоположными по направлению импульсами. В действительности это не так. Однако нейтрино, обладающее нужной энергией с точки зрения спасения закона сохранения энергии, имеет и некий импульс,



ФИГ. 21. *Какие величины могут быть измерены при β-распаде.*

Если бы не было нейтрино, то вместо фиг. 20 мы имели бы такой результат при β-распаде нейтрона.

и этот импульс оказывается в точности таким, какой необходим, чтобы в комбинации с импульсами электрона и протона получить суммарный импульс, равный нулю. Без каких-либо дополнительных забот (и введения новых предположений) нейтрино спасло второй столь же фундаментальный закон сохранения. И существование этой частицы стало казаться вполне правдоподобным.

Без нейтрино нарушился бы и закон сохранения момента количества движения. К примеру, как видно из фиг. 21, спины электрона и протона взаимно компенсированы, но исходный нейтрон имел отличный от нуля спин. Если предположить, что нейтрино само имеет спин, равный половине, то это добавит к заслугам нейтрино еще спасение закона сохранения момента количества движения. Спин нейтрино никогда не измерялся непосредственно, но имеются достаточные косвенные доказательства, как, например, успешное

предсказание теорией Ферми явлений β-распада, что его спин, безусловно, равен $^1/_2$.

Наконец, электронное нейтрино спасло закон сохранения электронного (лептонного) заряда, ибо сопровождающее электрон антинейтрино приводит к тому, что суммарный электронный (лептонный) заряд после распада равен нулю, как и до распада.

В действительности закон сохранения электронного заряда появился на сцене уже *после* признания нейтрино. Поскольку принцип симметрии, на котором покоится этот закон сохранения, неизвестен, у нас нет оснований особенно расстраиваться на данном этапе развития науки, если окажется, что этот закон нарушается. Тем не менее экспериментальные данные подтверждают *правильность этого закона сохранения*, и вполне возможно, что существует неизвестный нам принцип симметрии, на котором он и зиждется. Если это так, то тогда нарушение закона сохранения электронного заряда должно вызвать не меньшее смущение, чем нарушение законов сохранения энергии, импульса, момента количества движения, которые покоятся на однородности и изотропии пространства и времени.

Подробно излагать созданную Ферми теорию β-распада здесь нет смысла, однако важно отдавать себе полный отчет в том, что в этой теории нейтрино не ограничивается ролью спасителя четырех законов сохранения. Благодаря введению нейтрино появилась возможность предсказывать распределение вылетающих электронов с данной энергией и в разных направлениях, а также относительные вероятности β-распада различных радиоактивных ядер, причем все предсказания получили опытное подтверждение. (На самом деле в теории Ферми существовали некоторые неоднозначности, устраненные лишь в 1957 г.) Помимо этого, теория Ферми была успешно распространена со случая распада нейтрона на случай распада μ-мезона:

$$\mu^- \to \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Это тоже β-распад, ибо в нем происходит рождение электрона вместе с его антинейтрино.

Процесс, в результате которого возникает стабильная частица, обычно бывает совершенно аналогичен процессу, в котором она поглощается или аннигилирует. Так, фотон порожден колебаниями электрического заряда и его поглощение приводит заряды в движение. Электрон может родиться одновременно со своей античастицей — позитроном; он может погибнуть при встрече с позитроном, с которым он аннигилирует. Нейтрино вызывают к жизни процессы β-распада или другие процессы распада, которые обычно относят к так называемым «слабым взаимодействиям». Поэтому нейтрино может поглощаться и наблюдаться только благодаря последующим слабым взаимодействиям. В этом заложен ключ к пониманию трудностей наблюдения нейтрино. Нейтрино можно наблюдать только при его взаимодействии с веществом, однако вероятность такого взаимодействия, всегда приводящего к гибели нейтрино, чрезвычайно мала.

Мы ограничимся здесь рассмотрением процесса, который первоначально использовался для поимки неуловимого нейтрино (на самом деле антинейтрино). Антинейтрино может рождаться в процессах β-распада:

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Если впоследствии антинейтрино встретится с другим протоном, то оно может с определенной, но очень малой вероятностью погибнуть в процессе так называемого обратного β-распада:

$$\bar{\nu}_e + p \to n + e^+.$$

Протон и антинейтрино исчезнут, а нейтрон и позитрон родятся. В процессе захвата участвуют те же частицы, что и в процессе рождения, за исключением того, что законы сохранения электрического и электронного зарядов требуют участия в процессе захвата *антиэлектрона* (позитрона), в то время как в процессе рождения действующим лицом является электрон.

Можем ли мы таким способом оценить вероятность захвата антинейтрино? Это нетрудно сделать,

причем результат оказывается весьма неожиданным и наглядно демонстрирует нам, что несколько минут в масштабах мира элементарных частиц — это чрезвычайно продолжительный отрезок времени. Начнем с того, что свободный нейтрон, прежде чем испытать самопроизвольный β-распад и превратиться в протон, электрон и антинейтрино, живет в среднем 17 *мин*, или 1000 *сек*. Это означает, что если другое антинейтрино, обладающее сравнимой энергией, в течение 17 *мин* находится в контакте с протоном, то произойдет захват, ведущий к обратному β-распаду. Поскольку нейтрино всегда движется со скоростью света, оно не в состоянии «усидеть» вблизи какого-либо протона не только 17 *мин*, но даже малой доли секунды. Но по мере того как нейтрино движется в веществе, у него будут происходить следующие одна за другой встречи со многими протонами, каждая на одно мгновение, и обратный β-распад произойдет после того, как полная продолжительность этих встреч достигнет (в среднем) примерно 17 *мин*. (Точное время зависит от величины энергии антинейтрино и природы ядер, с которыми сталкивается антинейтрино в веществе, но величина 17 *мин* вполне подходит для нашей грубой оценки.)

За 17 *мин* антинейтрино успеет пройти расстояние $3 \cdot 10^{13}$ *см*, т. е. примерно в два раза больше расстояния от Земли до Солнца (путешествие, которое занимает 8 *мин*). Вообразим теперь твердую стену толщиной $3 \cdot 10^{13}$ *см*. Будем считать, что нейтрино, пролетающее через эту стену, имеет вид крошечного шарика с размерами, примерно равными ее собственной длине волны, скажем $4 \cdot 10^{-11}$ *см*, т. е. в 500 раз меньше поперечника атома. Волновые свойства антинейтрино имеют первостепенное значение. Но если бы оно действительно было точечной частицей, то вероятность столкнуться с ядром при прохождении через атом была бы ничтожной. Однако волновые свойства частиц расширяют сферу действия антинейтрино и делают присутствие антинейтрино ощутимым на расстояниях порядка его длины волны. Правда, эта длина волны мала, и эффективные размеры нейтрино ничтожны по сравнению с размером атома. Если бы мы могли сделать серию моментальных снимков и

запечатлеть, как проходит наше размытое и протяженное антинейтрино через вещество, то почти всегда обнаруживали бы его в пространстве между ядрами, а не непосредственно рядом с ядром. И лишь на одном из многочисленных снимков антинейтрино оказалось бы в непосредственной близости от ядра. Таким образом, пройдя за 17 *мин* через плотную стену толщиной 300 млн. *км*, антинейтрино находилось бы в контакте с протонами в ядрах лишь в течение ничтожной доли этого времени, ибо на протяжении большей части пути оно находится вдали от ядер. И действительно, антинейтрино находится в контакте с ядрами в течение примерно лишь одной стомиллионной доли этого времени, и, чтобы продолжительность тесного взаимодействия протона с антинейтрино достигла 17 *мин*, толщину стены потребовалось бы увеличить в 100 млн. раз. Антинейтрино надо пройти через плотную стену толщиной $3 \cdot 10^{16}$ *км*, или 3000 световых лет, прежде чем оно поглотится и вызовет обратный β-распад! Это расстояние в 200 млн. раз превышает расстояние от Земли до Солнца и примерно в 10 раз больше размеров нашей Галактики.

Интересно провести аналогичные выкладки для случая фотона видимого света. Начнем с того, что атому требуется всего 10^{-8} *сек* (одна стомиллионная доля секунды), чтобы испустить такой фотон. Этому фотону требуется пробыть в контакте с атомами всего около 10^{-8} *сек*, чтобы атом поглотил его. За время 10^{-8} *сек* фотон успевает пройти 300 *см* (3 *м*). Однако «размеры» нашего фотона столь велики, что в любой момент он охватывает очень большое число атомов. Длина волны обычного светового фотона примерно в 1000 раз превышает размеры атома. Поэтому мы можем представлять себе фотон в виде размытого шарообразного облака, окутывающего одновременно около миллиарда атомов $(1000 \times 1000 \times 1000)$. При прохождении через вещество фотон в противоположность крошечному нейтрино взаимодействует с огромным числом поглощающих атомов. И поскольку в каждое мгновение миллиард различных атомов имеет возможность поглотить наш фотон, он вместо того, чтобы пройти до поглощения весь трехметровый путь, успевает сделать лишь одну миллиардную часть пути.

Поэтому глубина проникновения фотона составляет лишь $3 \cdot 10^{-7}$ *см*, или 15 атомных слоев, что абсолютно непохоже на путь нейтрино, длящийся более трех тысяч световых лет! Как правило, если мы смотрим на твердый предмет, то видим лишь его внешнюю поверхность, так как фотоны видимого света не могут проникать внутрь на сколько-нибудь значительное расстояние[1]). Имеется ряд исключений (стекло или плексиглас), когда свет проникает на многие метры, однако мы не будем здесь останавливаться на причинах этого. Но даже в этих исключительных случаях проникнуть на большое расстояние удается лишь фотонам с определенными длинами волн. Например, обычное стекло уже при очень небольших толщинах непрозрачно для ультрафиолетовых фотонов (потому-то оно обеспечивает защиту от загара).

Отметим, что в рассмотренных выше примерах поразительное различие проникающей способности в твердом веществе нейтрино и фотонов объясняется двумя факторами. Во-первых, это разница в длине волны. Во-вторых, что более важно, это разница во времени взаимодействия, которое необходимо для того, чтобы произошло поглощение. Фотону необходимо взаимодействовать с атомами 10^{-8} *сек*; нейтрино требуется взаимодействовать с ядрами 10^{3} *сек*, т. е. в 100 млрд. раз дольше. Это различие во времени отражает фундаментальную разницу в интенсивности (силе) взаимодействий. Из-за того что эта разница столь значительна, физики разделяют взаимодействия на два класса: электромагнитные взаимодействия, ответственные за поглощение фотона, и «слабые взаимодействия», ответственные за поглощение нейтрино. (Существуют еще два класса взаимодействий, с которыми мы будем иметь дело в главе шестой: гравитационные, более слабые, чем «слабые взаимодействия», и «сильные», более сильные, чем

[1]) Фотоны с малой длиной волны обычно проникают в вещество на большее расстояние, нежели длинноволновые фотоны, поскольку они взаимодействуют в каждый момент с меньшим числом атомов. Проникающее рентгеновское излучение имеет значительно меньшую длину волны, чем фотоны видимого света.

электромагнитные.) Нам следует согласиться, что «слабые взаимодействия» названы весьма удачно. Нейтрино, участвующее лишь в слабых взаимодействиях, практически неуловимо.

Как же удалось зарегистрировать нейтрино, если они в состоянии проникать через весь земной шар и любые приборы так, как если бы на их пути ничего не было, не оставляя при этом ни малейшего следа? На помощь физикам, пытавшимся изловить антинейтрино, пришли вероятностные законы, управляющие в природе элементарными процессами. В среднем эта неуловимая частица действительно может проникать в вещество на глубину свыше трех тысяч световых лет. А некоторые антинейтрино пройдут еще больший путь до поглощения, другие же поглотятся скорее, а есть и такие (их совсем немного), которые поглотятся на пути в несколько метров или несколько сантиметров. И физики, пытавшиеся подтвердить существование антинейтрино, должны были обратить свое внимание именно на эту небольшую группу частиц, которые по воле случая погибают преждевременной смертью, поглощаясь на расстояниях, значительно меньших, нежели их собратья.

Опыт, убедительно доказавший существование антинейтрино, провели в 1956 г. в Саванна-Ривер два физика из Лос-Аламоса (Нью-Мексико) — Клайд Коуен и Фредерик Райнес. В Саванна-Ривер они нашли то, чего им не хватило в Лос-Аламосе, — мощный ядерный реактор, обильный источник антинейтрино. Внутренняя зона реактора высокорадиоактивна и по своей β-активности уступает лишь ядерным взрывам. Внутри реактора происходит деление ядер урана, т. е. они разваливаются на части, превращаясь в более легкие ядра. Эти, как их называют, осколки деления сами по себе почти всегда радиоактивны и, спустя некоторое время, испускают β-частицы (электроны), сопровождаемые антинейтрино. Эта радиоактивность есть побочный продукт деления и не имеет непосредственного отношения к работе реактора. Число антинейтрино, образующихся внутри реактора в единицу

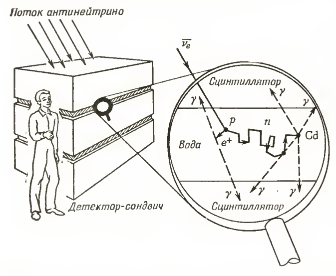
времени, можно подсчитать[1]), как и вероятность того, что одно из них поглотится в приборе. Произведение ничтожно малой вероятности поглощения антинейтрино на огромное число имеющихся антинейтрино дает число частиц, которые должны поглотиться в приборе. Райнес и Коуен подсчитали, что каждые 20 *мин* будет поглощаться одно антинейтрино — немного, но в общем достаточно.

Основным узлом экспериментальной установки служил набор («сандвич») баков, заполненных обычной водой в качестве промежуточной («мясной») прослойки толщиной 3 дюйма и специальной жидкостью, называемой сцинтиллятором, в качестве «хлебных» ломтей толщиной 2 фута. Чтобы увеличить вероятность захвата антинейтрино, физики построили «двойной сандвич» (фиг. 22) высотой более человеческого роста, а шириной и длиной почти таких же размеров. Баки со сцинтиллятором были окружены более чем сотней фотоумножителей — «электрическими глазами», всматривающимися в темные недра бака. Фотоумножители подсоединялись к сложным электронным схемам. Эти схемы должны анализировать то, что увидят фотоумножители, и давать отчет об увиденном экспериментаторам.

Всякий раз, когда в жидкости появлялась быстрая заряженная частица, движущаяся в ней и теряющая, как это и положено, свою энергию, возникала слабая световая вспышка, сигнализирующая о прохождении заряженной частицы. Иными словами, жидкость начинала сцинтиллировать. Жидкие и твердые сцинтилляторы часто применяются для регистрации элементарных частиц, однако детекторы Райнеса и Коуена, вероятно, были самыми большими из когда-либо применявшихся сцинтилляторов. Косвенно сцинтиллятор реагирует и на попадающие в него нейтральные частицы. Например, фотон может поглотиться электроном, который приобретет при этом достаточную энер-

[1]) Об истинной скорости образования антинейтрино в реакторе Саванна-Ривер никаких официальных сообщений нет, поскольку эта скорость непосредственно связана с полной мощностью реактора, которая хранится в тайне. Но это, конечно, очень большая скорость, никак не меньше 10^{18} антинейтрино в 1 *сек*.

гию, чтобы вызвать световую вспышку. Нейтрон может поглотиться ядром, затем это ядро испускает излучение, которое и передаст свою энергию электронам, возбуждающим световые вспышки. С помощью жидкого сцинтиллятора тоже косвенным путем можно зарегистрировать захват антинейтрино.



ФИГ. 22. *Опыт Райнеса и Коуена по регистрации антинейтрино.*

В качестве «мясной» прослойки служит богатый протонами 3-дюймовый слой воды, смягченной хлоридом кадмия (ядра кадмия охотно поглощают нейтроны). «Хлебом» служат баки с жидким сцинтиллятором толщиной 2 фута, в которые всматриваются фотоэлектронные умножители.

Основная трудность заключается в том, чтобы выделить и надежно идентифицировать импульсы, отвечающие захвату антинейтрино, при наличии импульсов, обусловленных разнообразными элементарными событиями, непрерывно происходящими в баках. Кроме антинейтрино, в бак все время попадают и останавливаются в нем и другие частицы — нейтроны, γ-кванты и некоторые заряженные частицы как из реактора, так и от обычного космического излучения. Первое, и самое простое, что надлежало предпринять, это окружить бак толстым слоем защитных материа-

лов — земли и свинцовых кирпичей. Это позволило избавиться от большей части ненужных частиц без каких-либо помех для антинейтрино. Вторая, и более сложная, задача заключалась в том, чтобы с помощью радиоэлектроники отделить те события, которые отвечают захвату антинейтрино, от посторонних событий, называемых фоном. Именно эта задача и потребовала от экспериментаторов особой изобретательности.

Давайте теперь рассмотрим, что́ действительно происходит в субмикроскопических масштабах при захвате антинейтрино. Каждая молекула водяной прослойки содержит два атома водорода, в центре которых расположены протоны. Именно на эти протоны и возложен захват антинейтрино в процессе реакции

$$\overline{\nu}_e + p \to n + e^+.$$

На фиг. 22 справа изображена типичная последовательность событий после этой реакции захвата. Там, где до этого в центре атома водорода смиренно располагался протон, теперь внезапно возникают нейтрон и позитрон, причем обе частицы обладают некоторой кинетической энергией. Эти новые частицы разлетаются в разные стороны, но затем каждая из них постепенно теряет в воде свою энергию и замедляется. Заряженный позитрон испытывает электрическое взаимодействие с электронами соседних атомов и тормозится очень быстро (примерно за 10^{-9} *сек*, пройдя менее 1 *см*). Почти сразу же после торможения он аннигилирует с одним из атомных электронов, и масса этих частиц превращается в энергию в результате реакции

$$e^+ + e^- \to \gamma + \gamma.$$

Каждый из фотонов приобретает энергию, соответствующую массе одного электрона. Поскольку фотоны разлетаются в противоположные стороны, они, как правило, будут попадать в соседние баки со сцинтиллятором, где и будут возникать характерные световые вспышки, регистрируемые фотоумножителями.

Все события, вызываемые позитроном, происходят менее чем за миллионную долю секунды. В то же время лишенный заряда нейтрон, лениво двигаясь в воде,

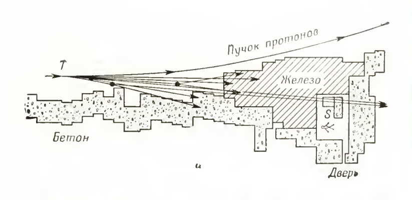
сталкивается с ядрами на протяжении нескольких миллионных долей секунды перед тем, как полностью замедлиться (фактически-то он замедляется не до состояния покоя, а лишь до малой скорости). Чтобы иметь гарантию, что замедлившийся нейтрон будет мгновенно захвачен, экспериментаторы добавляют в воду немного хлорида кадмия, ибо ядра кадмия с особым аппетитом пожирают нейтроны. По этой причине кадмий часто используют в «управляющих стержнях» реакторов. Эти стержни должны поглощать избыток нейтронов и препятствовать выходу реактора из-под контроля. Поглотив нейтрон, ядро кадмия испускает один или несколько γ-квантов, которые попадают в бак со сцинтиллятором и сигнализируют о том, что захват произошел.

В результате захвата антинейтрино протонами возникают всего три импульса. Первые два оказываются одновременными; они создаются в соседних сцинтилляторах двумя фотонами и сигнализируют об аннигиляции позитрона. Третий импульс, сигнализирующий о захвате нейтрона, создается одним или несколькими фотонами спустя несколько миллионных долей секунды после первых двух. Более того, каждый из этих трех импульсов характеризует определенную энергию, которую можно измерить фотоумножителем (по 0,5 *Мэв* у каждого из аннигиляционных фотонов и около 9 *Мэв* в сумме для процесса захвата нейтрона). В 1956 г., спустя пять лет после начала первых опытов по поимке антинейтрино, Райнес и Коуен сообщили о том, что им определенно удалось наблюдать электронное антинейтрино по зарегистрированной характерной последовательности сцинтилляционных импульсов во время работы реактора (примерно трижды в час).

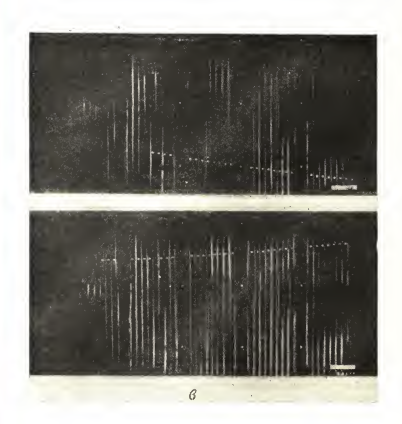
Группа ученых Колумбийского университета обнаружила в 1962 г. μ-мезонное нейтрино. Для этого потребовалось использовать совершенно иные экспериментальные средства. Основные реакции захвата

$$\overline{\nu_\mu} + p \to n + \mu^+ \quad \text{и} \quad \nu_\mu + n \to p + \mu^-$$

могут происходить только в том случае, если нейтрино (антинейтрино) имеют достаточную энергию (свыше



б



ФИГ. 23. *Обнаружение второго нейтрино.*

На фиг. *а* пучок протонов, движущихся по орбите Брукхэйвенского синхротрона с переменным градиентом, попадает на мишень *T*; всевозможные вторичные частицы летят вправо. Линии, пересекающие около 15 *м* железа и искровую камеру *S*, представляют собой нейтрино, возникающие в результате распада π-мезонов. Железо или бетон останавливают почти все прочие частицы (более короткие линии). Масштаб характеризуется фигуркой экспериментатора в помещении искровой камеры (магниты, управляющие движением первичного пучка протонов по орбите, не показаны). На фиг. *б* изображена искровая камера весом 10 *т*, содержащая 90 параллельных алюминиевых пластин площадью около 1 *м*². Искра, проскакивающая между парой пластин, сигнализирует о прохождении заряженной частицы. На фиг. *в* приведены две фотографии искровых следов, оставленных μ-мезонами, которые родились в результате захвата нейтрино в камере. Чтобы зарегистрировать 29 достоверных случаев рождения μ-мезона, пришлось ускорить около $3 \cdot 10^{17}$ протонов и заставить пройти через камеру 10^{14} нейтрино.

100 *Мэв*) для образования массы μ-мезона. Вероятность захвата увеличивается с ростом энергии нейтрино, так что для успешного проведения опыта понадобилась высокая энергия. А это потребовало работы самого большого из имеющихся ускорителей. Успешный опыт был выполнен в Брукхэйвене на протонном синхротоне с переменным градиентом (см. фиг. 4, стр. 25). На самом деле по причинам, которые будут изложены в дальнейшем, ускоритель в этом опыте работал при энергии лишь 15 *Гэв* (это примерно половина его максимальной энергии).

Благодаря короткой цепочке промежуточных превращений Брукхэйвенский ускоритель может легко создавать обильный поток нейтрино высоких энергий (фиг. 23). Протоны высокой энергии соударяются внутри ускорителя с ядрами мишени, в результате чего образуется целый каскад вторичных частиц, в том числе многочисленные π-мезоны. Заряженные π-мезоны, удаляясь от ускорителя, испытывают самопроизвольный распад, образуя необходимые нейтрино в результате следующих превращений:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{и} \quad \pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu}.$$

Поскольку вторичные частицы должны уносить импульс (равный импульсу первичного протона с высокой энергией), нейтрино и антинейтрино вместе со всеми остальными продуктами столкновения не разлетятся во всех направлениях, а будут вылетать лишь в узком конусе, направленном вперед.

Чтобы избавиться от нежелательных частиц и сохранить лишь нейтрино, экспериментаторы воздвигли на пути этого неоднородного пучка мощную железную стену толщиной более 13 *м*. За стеной расположили искровую камеру (см. фиг. 23) — устройство, в котором между двумя находящимися рядом металлическими пластинами проскакивают искры, намечая след заряженной частицы с большой энергией. При энергии ускорителя 15 *Гэв* железный барьер успешно задерживал все вторичные частицы, но для нейтрино он вообще не представлял препятствия. (При энергии 30 *Гэв* эта толщина железа уже не смогла бы защитить искровую камеру от всех посторонних частиц.)

Через искровую камеру в большом количестве мчались нейтрино и антинейтрино, причем вероятность поглощения каждой из этих частиц не превышала миллионной доли от одной миллионной. Если происходила реакция

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+,$$

то внутри камеры изредка возникал положительный μ-мезон, оставлявший свой след. Если бы μ-мезонное нейтрино было тождественно электронному, то должны были бы рождаться и позитроны, как это экспериментально установлено в Саванна-Ривер; рождение позитронов должно было происходить практически с той же частотой, что и рождение μ^+-мезонов. Аналогичным образом в одинаковых количествах должны были бы рождаться электроны и μ^--мезоны. Колумбийско-брукхэйвенская группа ученых за 300 часов зарегистировала в своей камере 29 следов μ-мезонов и ни одного следа электронов. Тем самым они обнаружили существование μ-мезонного нейтрино и в то же время показали, что оно не тождественно электронному нейтрино.

Когда писалась эта книга, в среде физиков еще шумели по поводу открытия второго нейтрино. Можно лишь надеяться, что появление еще одного экспоната зоопарка элементарных частиц поможет решению загадки многообразия элементарных частиц.

Если бы в 1956 г. антинейтрино не было зарегистрировано, то весь мир физиков, по-видимому, и до сей поры еще не оправился бы от шока, полученного в связи с этим событием. Нам было бы нелегко так сразу расстаться с законами сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Но уже после того, как нейтрино вернуло физикам покой, убедив их, что эти священные законы не будут нарушены, оно сыграло важную роль в ниспровержении другого закона — закона сохранения четности (смысл четности будет обсуждаться в главе восьмой). Здесь мы хотим лишь упомянуть о новом и неожиданном свойстве нейтрино, выявившемся в процессе изучения четности. Нейтрино оказалось левовинтовым.

Согласно квантовой механике, частица типа нейтрино со спином, равным $^1/_2$, может иметь спин,

ориентированный либо в направлении движения частицы, либо в противоположном направлении. Если мы предположим, к примеру, что Земля сжалась до размеров элементарной частицы и ее момент количества движения уменьшился до величины $\hbar/2$, то тогда она могла бы двигаться вперед либо северным полюсом, либо южным полюсом. Если вперед будет направлен северный полюс, наблюдатель, находящийся на пути Земли, обнаружит, что вращение происходит против часовой стрелки, и спин будет направлен по движению. В противном случае, когда вперед направлен южный полюс, спин будет ориентирован против движения. Первый случай (движение вперед северным полюсом) называется также правовинтовым движением, так как здесь вращение и направление движения соответствуют *обычному*, правому винту. Его можно воспроизвести с помощью «правила правой руки». Пусть большой палец правой руки направлен по движению. Тогда слегка согнутые пальцы будут указывать направление правовинтового вращения.

Электроны, протоны или нейтроны, словом частицы со спином $^1/_2$, могут совершать как правовинтовые, так и левовинтовые движения, т. е. их спин может быть ориентирован как по направлению движения, так и против. Замечательный факт, обнаруженный в 1957 г., заключается в том, что нейтрино всегда левовинтовое (а антинейтрино всегда правовинтовое).

Левовинтовым оказались оба нейтрино, как электронное, так и μ-мезонное. Мы остановимся здесь лишь на вопросе, почему оказывается левовинтовым μ-мезонное нейтрино. Положительный π-мезон распадается на положительный μ-мезон и нейтрино, разлетающиеся в противоположные стороны (фиг. 24). Законы сохранения позволяют установить все свойства нейтрино из наблюдений над одним μ-мезоном. При этом оказывается, что все μ-мезоны, вылетая, совершают левовинтовое движение, т. е. их спины ориентированы вдоль траектории и направлены против движения (см. фиг. 24). Закон сохранения импульса требует, чтобы нейтрино двигалось точно в противоположную сторону от μ-мезона. А закон сохранения момента количества движения подразумевает, что направления спинов μ-мезона и нейтрино также должны

быть противоположны. Таким образом, нейтрино при вылете также должно совершать левовинтовое движение. (Воспользуйтесь правилом правой руки, чтобы проверить это утверждение для случая, изображенного на фиг. 24.) Наконец, обращая эти рассуждения, можно сказать, что μ-мезон в этом распаде испускается левовинтовым, поскольку нейтрино левовинтовое.



ФИГ. 24. *Образование левовинтового нейтрино при распаде положительного π-мезона.*

Здесь имеется некая тонкость, связанная с вопросом о том, какая из вылетающих частиц «истинно» левовинтовая. Предположим, что мы сели на космический корабль и догнали μ-мезон, улетающий от места распада π-мезона. Приблизившись к μ-мезону, мы увидим, что его «северный полюс» направлен к хвосту нашего корабля, а «южный полюс» — к носу, как показано на фиг. 24. Но если мы выглянем из окна и посмотрим на μ-мезон, пролетая мимо него, то нам будет казаться, что он движется к хвосту, т. е. «северным полюсом» вперед. Теперь по отношению к нашей точке наблюдения на корабле μ-мезон будет правовинтовым. Однако мы не можем произвести тот же трюк и с нейтрино. Поскольку нейтрино движется со скоростью света, мы не сможем перегнать его, и, как бы мы не смотрели на нейтрино, оно всегда будет казаться нам левовинтовым. Поэтому есть полные основания говорить, что нейтрино — левовинтовая частица. А вот μ-мезон может совершать как левовинтовое, так

и правовинтовое движения и не является от рождения только тем или другим.

Мы завершим этот раздел, посвященный нейтрино, обсуждением нейтрино в космосе — увлекательной, но в то же время вряд ли разрешимой проблеме, интерес к которой связан с тем, что Вселенная обильно насыщена нейтрино, однако вероятность провести сколько-нибудь успешные наблюдения над этими космическими нейтрино крайне мала. Что нам известно о появлении и исчезновении нейтрино в космических масштабах? Любопытное обстоятельство заключается в том, что нейтрино появляются, но не исчезают. В каждой звезде происходит рождение нейтрино, которые непрерывным потоком поступают во Вселенную. Однако взаимодействие этих нейтрино с остальной частью вещества Вселенной столь слабо, что практически ни одно из них никогда не испытывает поглощения. Почти все нейтрино, родившиеся от 10 до 100 млрд. лет назад, т. е. сверстники Вселенной, все еще живы.

В недрах большинства звезд происходит превращение водорода в гелий. Процесс «выгорания» водорода проходит через несколько промежуточных этапов, но суммарный баланс можно символически записать в виде

$$2e + 4p \rightarrow (nnpp)_{\mathrm{He}} + 2\nu_e + k\gamma,$$

где $(nnpp)_{\mathrm{He}}$ означает два нейтрона и два протона, связанных в ядре гелия, а $k\gamma$ — некоторое неопределенное число фотонов. Написанная выше суммарная реакция есть простое следствие законов сохранения. Поскольку два из четырех протонов превращаются в нейтроны, то, согласно закону сохранения электрического заряда, для нейтрализации этих двух протонов требуются два единичных отрицательных заряда. Поэтому в реакции должны принимать участие два электрона (единственные доступные частицы с отрицательным электрическим зарядом). Однако электроны удовлетворяют закону сохранения электронного заряда; поскольку они вкладывают в реакцию свои электрические заряды, а затем исчезают, то вместо них должны появиться нейтральные члены их семей-

ства, которыми являются нейтрино. Наконец, закон сохранения энергии требует, чтобы еще что-то уносило энергию, возникающую в процессе сжигания водорода. Это возложено на фотоны. Образовавшиеся нейтрино беспрепятственно покидают недра звезды и начинают почти вечные странствия в космосе. А фотоны, прокладывая себе дорогу к поверхности звезды, многократно поглощаются и вновь испускаются. К тому времени, когда фотон испускается с поверхности звезды, его энергия успевает сильно деградировать; на каждое нейтрино с высокой энергией, покидающее звезду, испускается около 10 млн. фотонов с малой энергией. Однако полная энергия, уносимая из звезды нейтрино, составляет примерно 10% от энергии, уносимой фотонами. Как правило, каждое нейтрино уносит с Солнца около 1 *Мэв*, а фотон — лишь 2 *эв* (это соответствует видимому свету). Отметим, что звезды посылают в космос только нейтрино, а не антинейтрино.

То обстоятельство, что мы можем наблюдать звезды, удаленные от нас на десятки миллиардов световых лет, указывает на большую вероятность беспрепятственного путешествия фотонов во Вселенной. Это означает, что нейтрино много счастливее. Действительно, согласно грубой оценке, нейтрино, блуждающее в известной части Вселенной на протяжении примерно 10 млрд. лет, будет иметь всего один шанс поглотиться против 10^{25}! Наша Вселенная — это крошечные разреженные островки вещества, рассеянные в безбрежном пространстве. Она, конечно, значительно уступает твердой стене толщиной 3 тысячи световых лет, которая необходима для того, чтобы поглотить нейтрино с малой энергией. По прошествии миллиардов лет звезды будут продолжать излучать значительную часть своей энергии в виде нейтрино, одиноко блуждающих во Вселенной, и не оказывающих на нее никакого влияния. Кажется совершенно невероятным, чтобы человек смог в будущем воспользоваться энергией или даже информацией, несомыми космическими нейтрино, а они в принципе могут сообщить нам интересные данные, так как это единственные непосредственные очевидцы того, что происходит в недрах звезд.

Подобно тому как большую часть света, фотонов, Земля получает от Солнца, основную долю нейтрино ей также поставляет наше Солнце. На каждый миллион нейтрино, падающих на Землю, одно приходит из внешнего пространства, а остальные 999 999 — с Солнца. На каждый квадратный сантиметр земной поверхности (это примерно соответствует кончику пальца) Солнце посылает ежесекундно около $4 \cdot 10^{10}$ (40 млрд.) нейтрино и примерно в 10 млн. раз больше фотонов. Это означает, что каждый кубический сантиметр, расположенный внутри Земли или вблизи ее поверхности, содержит, грубо говоря, одно нейтрино. Рассказывают, что один из физиков вручил своему другу в качестве подарка пустую спичечную коробку с надписью «Гарантировано содержание 100 нейтрино». В масштабах человека это означает, что каждый из нас едва успевает моргнуть глазом, как на него обрушивается свыше 10^{12} нейтрино.

Трудности, связанные с наблюдением и использованием солнечных нейтрино, станут еще очевиднее, если мы укажем, что поток антинейтрино, имевшийся в распоряжении Райнеса и Коуена на реакторе в Саванна-Ривер, был примерно в миллиард раз больше потока солнечных нейтрино. Использование их установки для регистрации солнечных нейтрино позволило бы получать один отсчет за несколько тысяч лет[1]).

Гравитон

Как частица гравитон не играл в физике сколько-нибудь заметной роли. Причина этого не столько в том, что он никогда не наблюдался (нейтрино, например, стало неотъемлемой частью мира элементарных частиц задолго до того, как было непосредственно обнаружено), а в том, что мы не знаем какой-либо связи гравитона с другими элементарными частицами или их превращениями. Гравитон стоит особняком,

[1]) Для более детального ознакомления с физикой нейтрино и слабых взаимодействий читатель может обратиться к следующему обзору: М. А. Марков, Нейтрино, М., 1964. — *Прим. перев.*

ибо он ответствен за перенос гравитационных сил между макроскопическими и космическими телами, но (насколько мы сейчас знаем) не имеет никакого отношения к элементарным процессам рождения и аннигиляции, происходящим в микромире. Иными словами, квантовые свойства гравитона пока нигде не давали о себе знать.

Поучительно сравнить гравитацию и электричество. Нам известно множество «классических» электрических явлений в макромире — токи, текущие по проводам, удары молний, радио и телевидение. В этих электрических явлениях квантовые свойства или фотоны совершенно несущественны. Эти свойства начинают играть главную роль в электрических явлениях в мире атомов и ядер, где энергия каждого кванта оказывается неизмеримо больше энергии отдельного радиофотона. Более того, именно электрическими силами обусловлены устойчивость атома и способность к делению ядер. Мы встречаем электрические явления в широком диапазоне — от процессов с отдельными элементарными частицами до событий окружающего нас макромира, доступных нашим органам чувств, от преобладания дискретных, корпускулярных аспектов до непрерывных чисто волновых особенностей.

А гравитационные явления известны нам лишь в макроскопической области этого диапазона. Причины этого чрезвычайно просты. Гравитационные силы крайне слабы, они значительно слабее «слабого взаимодействия», которое испытывает нейтрино. Гравитационное притяжение между электроном и протоном меньше электрического в фантастическое число раз (примерно в 10^{40}). Не удивительно, что именно электрическое взаимодействие удерживает эти частицы рядом и служит причиной существования атома водорода, и когда атом водорода изменяет свое энергетическое состояние, то при этом испускаются и поглощаются фотоны, а не гравитоны. Простое притяжение гвоздя маленьким магнитом иллюстрирует нам масштаб этого различия. Магнит (имеющий в сущности электрическую природу) поднимает гвоздь вверх, противодействуя гравитационному притяжению всей Земли и легко побеждая в этом единоборстве.

И все же в масштабах Солнечной системы и Галактики гравитация, слабейшая из сил, становится главным действующим лицом. Гравитации удается одержать верх над сильным и слабым взаимодействиями потому, что последние имеют малый радиус действия. Будучи в принципе сильнее гравитации, эти силы становятся пренебрежимо малыми на расстояниях свыше 10^{-13} *см* и не оказывают никакого влияния на устойчивость Солнечной системы. Электрические силы, подобно гравитационным, дальнодействующие (они ослабевают по мере увеличения расстояния, однако эти силы затухают очень медленно по сравнению с быстрым исчезновением короткодействующих сил). Но Солнце и планеты (почти совершенно) электрически нейтральны, ибо они содержат в равном количестве положительные и отрицательные частицы. Поэтому электрические силы взаимно уничтожаются, и главным действующим лицом оказывается гравитация[1]). В происходящих вокруг нас гравитационных явлениях участвует столь несметное число гравитонов, что совершенно безнадежно рассчитывать в обозримом будущем зарегистрировать отдельный гравитон, эффекты которого сами по себе еще слабее, чем нейтрино.

Физикам часто задают вопрос, ответа на который никто не знает: а что, гравитон навсегда сохранит свое положение частицы, не связанной с элементарными процессами в микромире, или окажется, что это не так и гравитон имеет некоторое отношение к структуре элементарных частиц на более глубокой ступени строения вещества? Оптимист ответит, что природа имеет обыкновение связывать отдельные части в единое целое и что было бы странно, если бы

[1]) Мы упоминали ранее, что дальнодействующие силы переносятся частицами, лишенными массы (электрические — фотонами, гравитационные — гравитонами). Могло бы возникнуть подозрение, что слабое взаимодействие также должно относиться к дальнодействующему, так как оно переносится лишенными массы нейтрино. Причина, по которой это не так, заключается в том, что нейтрино никогда не рождаются и не поглощаются в одиночку, а лишь одновременно с электроном или μ-мезоном. Слабое взаимодействие переносится не одним нейтрино, а парой частиц, из которых лишь одна не имеет массы.

гравитон не играл в микромире никакой роли, и, более того, что гравитон может оказаться как раз тем, что необходимо для преодоления математических преград, возникающих при попытке теоретиков построить описание семейства элементарных частиц, не включая в него гравитон. Догматик ответит, что в настоящее время вообще нет никаких данных о том, что гравитон имеет какое-либо отношение к превращениям или структуре других частиц и что бесполезно пока говорить на эту тему.

Глава шестая

Остальные частицы, в том числе странные

Если электрон встречает позитрон, то они аннигилируют друг с другом. При сближении позитрон и протон взаимно отталкивают друг друга и затем поворачивают в разные стороны. Протон и нейтрон притягиваются друг к другу мощными ядерными силами. Круг замыкается парой электрон — нейтрон, которые практически не замечают друг друга и могут сосуществовать, никак не взаимодействуя. Совсем как представители животного мира, экспонаты зоопарка элементарных частиц взаимодействуют друг с другом самым различным образом, то притягиваясь, то отталкиваясь, иногда сильно, а иногда слабо, иногда с аннигиляцией, а порой по принципу «сам живи и жить давай другим». В последние годы мы многое узнали об этих взаимодействиях. Их изучение составляет главный предмет в исследованиях по физике элементарных частиц, но многое все же осталось еще для нас загадочным.

В большей или меньшей степени все частицы являются членами единого семейства. Каждая из частиц как-то реа-

гирует на присутствие других, и подобная реакция может носить самый различный характер — от полного игнорирования до неукротимого аннигиляционного взрыва. В действительности, насколько нам известно, процессы рождения и аннигиляции сопровождают все взаимодействия, какими бы слабыми они не были, однако более полно обсуждать эти обширные новые представления о взаимодействии частиц мы будем в главе седьмой. Взаимодействия лучше всего считать не слабыми и сильными, а быстрыми и медленными. Это скорее похоже на дружбу замкнутого северянина с общительным жителем юга. В одних случаях установление дружеских отношений может потребовать больше времени, чем в других, однако в конце отношения будут одинаково теплыми. Чтобы произвести желаемый эффект, может потребоваться, чтобы нейтрино пересекло толщу вещества размером в три тысячи световых лет, однако происходящее в конце концов поглощение будет столь же полным и недвусмысленным, как и внезапная гибель фотона после его проникновения в вещество на миллионную долю сантиметра. Но несмотря на то что каждое взаимодействие *сопровождается* процессами аннигиляции и рождения, пара частиц может пережить (обычно так и бывает) отдельное столкновение.

Частицы неотделимы от своих взаимодействий. Наилучший путь к пониманию свойств и поведения частиц — в исследовании их взаимодействий. Иногда мы говорим о «врожденных» свойствах частицы, т. е. о тех свойствах, которые мы сопоставляем самой частице, независимо от ее поведения в присутствии других частиц. Среди характеристик, причисленных к врожденным, — масса, электрический заряд и спин. Конечно, даже врожденные характеристики могут быть обнаружены и измерены только через посредство взаимодействий. Мы узнаем о наличии у частицы электрического заряда по ее способности испускать и поглощать фотоны и оказывать воздействие на другие заряженные частицы. Мы определяем массу частицы, устанавливая, насколько быстро она реагирует на воздействие приложенной к ней силы. Мы получаем сведения о ее спине только благодаря реакциям с другими частицами. Взаимодействие

связывает отдельные предметы окружающего нас мира в единое целое не только в буквальном смысле как силы, соединяющие в единое целое атомы, молекулы и планетные системы, но и в качестве переносчика информации. Лишь благодаря взаимодействиям элементарных частиц одна часть мира узнает о том, что происходит в другой. В частности лишь благодаря этим взаимодействиям человек получает сведения о том, что́ его окружает, и об остальной части Вселенной. Как подчеркивалось в главе пятой, именно взаимодействию фотонов с заряженными частицами иногда непосредственно, а иногда косвенно обязаны люди большей частью своих познаний и источников энергии.

Нет нужды говорить, что лишенная всех взаимодействий частица обращается в небытие. С практической точки зрения такая частица перестает существовать, поскольку она не имеет возможности проявить себя. Каждый имеет право изобретать сколько угодно подобных частиц, не подвергаясь преследованию со стороны физиков. Лишенные взаимодействий частицы совершенно безвредны; они не являются предметом изучения науки. В начале нашего века Эйнштейн изгнал из науки эфир, потому что он оказался совершенно невзаимодействующим и ненаблюдаемым, а следовательно, и ненужным.

Прежде чем получить возможность рационально классифицировать частицы и их наиболее интересные свойства, мы должны систематизировать их взаимодействия. Наиболее удивительная особенность взаимодействий элементарных частиц, несомненно, состоит в том, что все они относятся к одному из четырех классов, существенно различных по своим свойствам: *сильным, электромагнитным, слабым, гравитационным.*

Мы уже видели в главе пятой, что фотон имеет отношение к электромагнитным взаимодействиям, нейтрино — к слабым, а гравитон — к еще более слабым гравитационным взаимодействиям. Группируя попарно все тридцать шесть частиц, мы получаем 630 различных взаимодействующих пар — существенное усложнение по сравнению с установленным фактом существования лишь четырех различных типов взаимодействия между всеми этими парами.

Хотя природа сильного и слабого взаимодействий еще не совсем ясна (как видно из недвусмысленных названий), а о связи различных взаимодействий (если они вообще существуют) совершенно ничего неизвестно, тем не менее у нас имеется ряд любопытных фактов, касающихся взаимодействий четырех типов, фактов, которыми природа дразнит теоретиков, заставляя их испытывать танталовы муки, так как они не могут ими воспользоваться.

Во-первых, весьма заметно отличие силы разных взаимодействий. Сильное взаимодействие оказывается интенсивнее гравитационного в фантастическое число раз, что-то около 10^{40}. На фоне ядерных сил (сильное взаимодействие) силы, действующие в масштабах космоса (гравитационные силы), выглядят, конечно, весьма тщедушными. Электромагнитное взаимодействие уступает по своей интенсивности сильному «всего» примерно в 100 раз, но зато превосходит слабое в огромное число раз, 10^{13}. В свою очередь слабое взаимодействие оказывается интенсивнее гравитационного в 10^{25} раз. В действительности приведенные цифры не дают точных соотношений и указывают лишь на то, что различные взаимодействия отделяют друг от друга глубокие пропасти.

Второй любопытный факт, относящийся к четырем типам взаимодействия, заключается в существовании правила, гласящего, грубо говоря, что чем сильнее, тем малочисленнее. Из перечисленных в табл. 1 четырнадцати сортов частиц 8 (все мезоны и барионы) участвуют в сильных взаимодействиях, 11 (т. е. все, кроме гравитона и обоих нейтрино) — в электромагнитных взаимодействиях, 13 (т. е. все, за исключением гравитона) — в слабых взаимодействиях и все 14 — в гравитационном взаимодействии[1]). Или, обра-

[1]) Даже лишенные массы частицы подвержены действию гравитации, поскольку гравитация, самое универсальное из взаимодействий, притягивает любой сгусток энергии независимо от того, сконцентрирована эта энергия в форме массы или нет. Например, влияние силы тяжести на фотоны было впервые обнаружено в результате наблюдения отклонения Солнцем светового луча. В 1960 г. это влияние было подтверждено с гораздо большей степенью точности в лабораторном опыте, в котором удалось измерить крошечное приращение энергии фотона, возникавшее в результате его «падения» в поле тяжести Земли.

щая это правило, можно сказать: чем слабее взаимодействие, тем большее число частиц оно охватывает. Более того, если частица испытывает какое-либо из этих взаимодействий, то она подвержена и всем более слабым взаимодействиям; если переходить к более слабым взаимодействиям, то список частиц будет расширяться без единого исключения. Таким образом, восемь типов сильно взаимодействующих частиц участвуют также в электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях. Любопытно, что в сильных взаимодействиях участвуют восемь наиболее тяжелых частиц (π-мезоны и более тяжелые частицы). На ступенях, идущих вниз (в сторону уменьшения массы), расположены μ-мезон, электрон и фотон. На двух последних ступенях к обычным частицам добавляются также частицы, лишенные массы. Ни один из этих фактов не нашел пока объяснения.

Наконец, существует исключительно любопытная связь между силой взаимодействия и законами сохранения. Все взаимодействия элементарных частиц находятся под контролем семи абсолютных законов сохранения, обсуждавшихся в главе четвертой. Но, кроме них, имеются и некоторые частные законы сохранения, справедливые для одних и нарушаемые другими. Правило гласит, что чем сильнее взаимодействие, тем в большей степени воздействуют на него дополнительные законы сохранения, ограничивающие возможные превращения частиц. Сильные взаимодействия подчиняются законам сохранения зарядовой четности, изотопического спина и странности. (Что утверждают эти законы сохранения со странными названиями, мы узнаем в главе восьмой. Пока нас интересует лишь число этих законов.) Более слабые взаимодействия превращаются в нарушителей законов, и чем слабее взаимодействие, тем больше «беззакония». Электромагнитные взаимодействия нарушают закон сохранения изотопического спина (иными словами, электромагнитные взаимодействия выходят за рамки этого закона). Еще дальше заходят слабые взаимодействия, нарушающие все четыре специальных закона сохранения. Поскольку о гравитационном взаимодействии элементарных частиц в действительности ничего не известно, остается откры-

тым вопрос, не идет ли это взаимодействие еще дальше в нарушении законов и не нарушает ли оно один или несколько неприкосновенных «абсолютных» законов сохранения. Если бы это было так, то последствия сказались бы лишь в космических масштабах. Например, нарушение гравитационным взаимодействием закона сохранения барионов привело бы к постепенному образованию новых протонов и нейтронов, как это предполагается в стационарной модели Вселенной, или постепенному разрушению этих частиц, подрывающему материальную основу мира. К счастью, нам известно, что последний процесс если вообще и имеет место, то происходит во всяком случае слишком медленно, чтобы привести к каким-либо последствиям на протяжении сотен миллиардов лет. Могло бы оказаться, что на гравитации лежит ответственность за возникновение неоднородности пространства и времени (общая теория относительности предсказывает, что так и должно быть). Это привело бы к нарушению фундаментальной симметрии, лежащей в основе законов сохранения энергии, импульса и момента количества движения. Но и в данном случае эти законы сохранения были бы почти справедливы, и их нарушение имело бы роковые последствия лишь в обширных космических масштабах пространства и времени там, где гравитация играет роль главного взаимодействия.

Последовательное рассмотрение всего перечня элементарных частиц, их взаимодействий и свойств потребовало бы долгого и однообразного перечисления обширного количества фактов, накопленных об элементарных частицах. Но среди всех этих фактов особый интерес и, по-видимому, особое значение имеют данные двух типов. И для дальнейшей части нашего обзора, посвященного элементарным частицам, мы отберем из всего набора фактов лишь относящиеся к двум выделенным категориям. Они либо особенно просто и красиво будут иллюстрировать некоторые фундаментальные стороны законов природы, либо четко обрисуют нам некоторые вопросы, в которых мы несведущи. Например, само существование электрона как стабильной частицы служит примером факта, относящегося к первой категории, ибо он

иллюстрирует значение закона сохранения заряда, а также подтверждает справедливость этого закона с высокой степенью точности. Упоминавшиеся соотношения между интенсивностями различных взаимодействий, число известных частиц и законов сохранения — все эти данные принадлежат к фактам второй категории. Они наверняка должны иметь большое значение, и в один прекрасный день их, без сомнения, станут по справедливости считать теми вехами, которые должны привести современных физиков к установлению звеньев, связывающих между собой различные типы взаимодействий. А сегодня они выглядят лишь вехами нашего неведения на передовых рубежах знания.

Электроны и μ-мезоны

В виде μ-мезона и электрона природа подарила нам загадочную пару «тождественных» близнецов, каждый из которых представляет собой точную копию другого, если не считать того, что один из них карлик, а другой великан. Ведь μ-мезон в две сотни раз массивнее электрона, а в остальном почти неотличим от него.

На самом деле электрон и его нейтрино являются двойниками соответствующих членов μ-мезонного *семейства.* Вследствие почти полной тождественности двух нейтрино можно говорить, что электрон и μ-мезон сами по себе почти двойники. Каждый из них несет отрицательный электрический заряд и имеет положительно заряженную античастицу, обладает спином, равным $^1/_2$, подчиняется простому закону сохранения членов семейства, и, что наиболее важно, каждое из этих маленьких семейств участвует абсолютно в одних и тех же взаимодействиях со всеми остальными элементами частиц. Это единственная в мире элементарных частиц пара семейств-близнецов, и она упорно мозолит глаза физикам. Однако до сих пор эта загадка еще не разгадана.

Пропасть, разделяющая близнецов по массам, должна проявляться в некотором различии их свойств. Но никаких дополнительных различий до сих

пор не было обнаружено, несмотря на то что μ-мезон — наиболее подробно исследованная короткоживущая частица. В теории не было предложено ни одного убедительного объяснения этой разницы масс. Загадочное различие масс электрона и μ-мезона принадлежит к числу тех проблем, которые изучены достаточно, чтобы ставить вопросы, но на которые мы еще не можем ответить.

Несмотря на огромную разницу в массах, μ-мезон и электрон представляют собой самые легкие заряженные частицы; это единственные частицы, обладающие массой и не испытывающие сильных взаимодействий. В списке элементарных частиц они оказываются ближайшими соседями, хотя и расположены на удалении друг от друга. Все более тяжелые частицы участвуют в сильных взаимодействиях. Единственными более легкими частицами оказываются частицы, лишенные массы.

Прежде чем остановиться на некоторых вопросах, относящихся к тождественности наших близнецов, мы должны рассмотреть два вопроса. Почему нас так беспокоит большое различие близнецов по массам? Почему огромная разница во временах жизни этих частиц не является проблемой (т. е. почему это вообще не считается истинным «различием»)?

Масса представляет собой наиболее концентрированную и наиболее загадочную форму энергии. У нас нет глубокого понимания природы массы. Мы не знаем, почему у протона или любой другой частицы то или иное количество энергии сосредоточено в массе. И все же, снабдив нас грубыми экспериментальными данными о массах частиц, природа дала нам в руки нити, ведущие к решению проблем происхождения и величин масс. Возникшее таким путем не очень глубокое понимание обнаруживает парадоксальный характер различия масс μ-мезона и электрона.

Мы выписали в табл. 3 массы и разности масс некоторых пар частиц, предоставляя тем самым читателю возможность самому обнаружить эти нити. Без ущерба для дела электрон и μ-мезон не включены в таблицу, а массы выражены не в обычных единицах массы электрона, а в эквивалентных энер-

гиях, в миллионах электронвольт (*Мэв*) [1]). Задача состоит в том, чтобы, делая вид, что мы ничего не знаем о μ-мезоне и электроне, обнаружить тенденции в массах более тяжелых частиц и использовать их для предсказания грубой оценки величин масс μ-мезона и электрона.

ТАБЛИЦА 3

Разности масс некоторых частиц

Первая частица	Ее масса, *Мэв*	Вторая частица	Ее масса, *Мэв*	Разность масс обеих частиц, *Мэв*
π^+	139,6	π^-	139,6	0
π^+	139,6	π^0	135,0	4,6
K^+	493,8	π^+	139,6	354,2
K^+	493,8	K^0	498,0	—4,2
p	938,2	n	939,5	—1,3
p	938,2	K^+	493,8	444,4
p	938,2	$\overline{p}$	938,2	0
Σ^+	1189,4	Σ^0	1192,4	—3,0
Σ^+	1189,4	Σ^-	1197,1	—7,7
Σ^+	1189,4	Λ^0	1115,4	74,0
Σ^+	1189,4	$\overline{\Sigma^+}$	1189,4	0
Ξ^-	1320,8	Σ^-	1197,1	123,7

Прежде всего из табл. 3 видно, что разности масс не обнаруживают простой зависимости. Ни одна из них не оказывается, скажем, в два или три раза больше другой. Однако эти разности интересны в другом отношении. В соответствии с их величинами они распадаются на три группы. Некоторые разности точно равны нулю. Другие «малы», они равны от 1 до 7 *Мэв*; третьи оказываются «большими» и равны от 74 до 444 *Мэв*. Более того, как показывает детальное рассмотрение, данная пара частиц относится к

[1]) Напомним, что слово «электрон» в единице энергии «электронвольт» не имеет прямого отношения к электрону.

одной из этих трех групп. У трех приведенных в табл. 3 пар частица — античастица разность масс равна нулю: $\pi^+ - \pi^-$, $p - \overline{p}$ и $\Sigma^+ - \overline{\Sigma^+}$. Равенство масс частицы и античастицы — это универсальное правило, имеющее теоретическое объяснение.

Приведенные в табл. 3 пары с маленькой разностью масс состоят в близком родстве. Каждая такая пара содержит частицы, которые различаются только электрическими свойствами. Протон и нейтрон, или положительный и нейтральный π-мезоны, или две различные Σ-частицы — все это частицы с различными электрическими зарядами, несколько отличными массами, а в остальном полностью идентичные. Протон и нейтрон принадлежат к барионам со спином, равным $^1/_2$, и абсолютно одинаковым сильным взаимодействием. Их электромагнитные взаимодействия, очевидно, различны, поскольку одна из частиц заряжена, а другая нет.

Напрашивается естественный вывод, что частицы должны иметь разные массы из-за различия электрических зарядов, что электромагнитное взаимодействие каким-то образом создает различие в массах. Квантовая механика утверждает, что, взаимодействия частицы должны вносить вклад в ее массу, однако умалчивает о том, как велик этот вклад. Как следует из опыта, вклад электромагнитного взаимодействия в величину массы составляет несколько *Мэв*. Поразительно, что у частиц со столь сильным различием масс и других свойств, как у π-мезона и Σ-частицы, электромагнитная разность масс оказывается, грубо говоря, одной и той же. О том, каким образом «взаимодействие» может менять массу частицы, которая предоставлена самой себе и не взаимодействует больше ни с чем, мы будем говорить в последующих разделах этой главы.

Если электромагнитные взаимодействия могут обеспечить лишь несколько *Мэв*, то откуда же берется остальная масса? Ответить на этот вопрос может помочь наша таблица. Переходя к большим значениям разности масс, мы обнаруживаем, что они встречаются у частиц, которые сильно отличаются друг от друга. Истинная причина лежит в том, что эти пары частиц по-разному участвуют в сильных

взаимодействиях. Протон и K^+-мезон, хотя и принадлежат к числу сильно взаимодействующих частиц (как и все частицы в таблице), не будут, однако, иметь в точности одинаковые свойства в отношении сильных взаимодействий. И за это большое различие масс, по-видимому, ответственны сильные взаимодействия. Подобная мысль представляется весьма привлекательной и вполне разумной. Сильные взаимодействия по своей интенсивности примерно на два порядка превосходят электромагнитные взаимодействия, а приведенные в таблице большие разности масс примерно в 100 раз превышают малые разности.

В табл. 3 содержится еще одно чрезвычайно важное указание. Обратившись теперь к самим массам частиц, а не к разностям масс, мы обнаруживаем, что они лежат в диапазоне от 130 до 1300 *Мэв*. Но в этом же интервале заключены и большие разности масс. Напрашивается логический вывод, что то, что создает большую разницу масс, могло бы в действительности быть причиной практически всей массы. Подобную работу можно возложить только на плечи сильных взаимодействий.

Чтобы представить себе картину строения элементарной частицы, к которой мы пришли таким путем, вообразим каменщика, у которого есть гранитные плиты высотой около 8 *м*, кирпичи, банка с краской и куски наждачной бумаги. Размеры любой положенной им кладки определяются главным образом числом использованных гранитных плит, которые служат своего рода кирпичами «сильного взаимодействия». Из одной плиты он строит «π-мезон», из двух — «K-мезон», а из трех — «нуклон». (Большие кирпичи, которыми пользуется природа, конечно, не все одного и того же размера, и это затрудняет наши попытки определить особенности конструкции по характеру конечного изделия.) Чтобы немного изменить высоту кладки, каменщик может добавить один или пару слоев кирпича (они соответствуют «электромагнитному взаимодействию»). Отдельная плита могла бы характеризовать нейтральный π-мезон, а плита, дополненная слоем кирпича, — заряженный π-мезон. (И опять-таки в природе все совсем не так просто. Появление заряда может сопровождаться как не-

большим увеличением, так и уменьшением массы частицы.) Затем для еще более точной подгонки размера своей кладки каменщик мог бы добавить несколько слоев краски или снять сверху немного краски наждачной бумагой. На его банке с краской наклеена этикетка «слабые взаимодействия», а то, что останется на наждачной бумаге, — это «гравитационное взаимодействие». От того что кладку слегка потрут наждачной бумагой, ее размеры вряд ли заметно изменятся, и вполне возможно, что гравитационное взаимодействие не вносит ничего существенного в величину массы частиц. По-видимому, даже слабые взаимодействия вносят лишь чрезвычайно малый вклад в массу.

Рассмотрение экспериментальных значений массы частиц вместе с некоторыми положениями квантовой механики позволяет нарисовать следующую картину строения элементарных частиц. Сильное взаимодействие создает как бы большие кирпичи мироздания. На эту грубую конструкцию накладывается более тонкая (примерно в 100 раз более мелкая), которая состоит из кирпичей, созданных электромагнитным взаимодействием. Еще гораздо более тонкая конструкция (в виде слоев краски), как правило пренебрежимо малых размеров, возникает благодаря слабым взаимодействиям. Таким образом, *разница* в массах частиц обусловлена различием их взаимодействий. Если сильные взаимодействия частиц оказываются неодинаковыми, то частицы будут значительно отличаться и по массам. Если же сильные взаимодействия одинаковы, но различны электромагнитные взаимодействия, то частицы будут отличаться по массам значительно меньше. Если частицы идентичны как в отношении сильных, так и в отношении электромагнитных взаимодействий, подобно парам частица — античастица (исключение составляет знак электрического заряда, однако это не имеет никакого значения), то у них вообще не будет различия в массах.

Какие предсказания относительно масс μ-мезона и электрона можно сделать на основе развитых выше представлений о массах частиц? Эти частицы совершенно не участвуют в сильных взаимодействиях. Они должны строиться только из электромагнитных

кирпичей без использования больших плит сильного взаимодействия. Поэтому естественно предположить, что частицы, не испытывающие сильных взаимодействий, все должны иметь небольшие массы и не сильно отличаться по массам, скажем не более чем на 7 *Мэв*. С электроном и нейтрино все обстоит благополучно. Нейтрино лишено массы, а масса электрона составляет 0,5 *Мэв* — это даже превосходит самые оптимистические ожидания. Мы можем представлять себе электрон в виде заряженного нейтрино. Электрон и его нейтрино принимают одинаковое участие (фактически никакого) в сильных взаимодействиях и различаются только электрическим зарядом, т. е., грубо говоря, находятся в таких же отношениях, как π^+- и π^0-мезоны. А как же с μ-мезоном, масса которого составляет 105 *Мэв*? Он безжалостно нарушает с трудом добытое нами правило. Его масса близка к массе π-мезона, что указывает на наличие в его структуре кирпичей сильного взаимодействия, хотя ряд тщательных проверок обнаружил у μ-мезона полное отсутствие сильных взаимодействий.

Этот небольшой экскурс в проблему масс элементарных частиц позволил нам пролить свет на причину «аномальности» μ-мезона. Во-первых, здесь нарушается правило, согласно которому бо́льшую массу имеют лишь сильно взаимодействующие частицы. Во-вторых, нарушается правило, согласно которому частицы, чтобы иметь различные массы, должны обладать отличными друг от друга свойствами, а электрон и μ-мезон (насколько сейчас известно) обладают совершенно одними и теми же свойствами. Мы можем отделаться от второго парадокса, предположив, что электрон и μ-мезон должны иметь некоторые, пока не обнаруженные различия. Но первого парадокса избежать не удается. Если частица сильно взаимодействует, то она сильно взаимодействует, и от этого никуда не денешься. Никакое детальное изучение блохи не превратит ее в слона. Здесь нет никаких сомнений: μ-мезон в сильных взаимодействиях *не участвует*. А поскольку нам не удается отделаться от этого парадокса, то, очевидно, наши неправильные представления о массе нуждаются в пересмотре. Таково современное состояние этой проблемы. Самой

упрямой частицей, отказывающейся подчиняться общим правилам, оказался μ-мезон, но возможно, что именно он научит нас тому, как следует изменить эти правила.

Второй вопрос, с которым мы хотели покончить, заключается в следующем: почему несущественна разница во временах жизни? Мы имели смелость заявить, что μ-мезон и электрон сходны во всех отношениях, кроме массы, хотя μ-мезон живет две миллионные доли секунды, а электрон бессмертен. Первое, что следует сказать об этом различии, это то, что две миллионные доли секунды практически означают вечность. В этот промежуток времени μ-мезон может пройти расстояние, в 10^{18} раз превышающее его собственные размеры. Если вернуться к аналогии, приведенной в главе второй, то μ-мезон будет похож на автомашину, успевшую пройти до того, как развалиться на части, более 10^{15} *км* (что, конечно, значительно превышает расстояние, покрытое всеми когда-либо существовавшими автомашинами вместе взятыми). Мы, не колеблясь, можем сказать, что такая автомашина практически вечна (если ей придется ежегодно проходить десять тысяч километров, то она просуществует сто миллиардов лет).

Но главное не исключительно большое время жизни μ-мезона в масштабах микромира. Основной факт состоит в том, что электрон лишь «случайно» оказался бессмертным. Закон сохранения электрического заряда препятствует естественному намерению электрона окончить свой жизненный путь, превратившись в более легкие частицы, тогда как μ-мезон может распадаться, не нарушая каких-либо законов сохранения, что он и делает. Это различие похоже на то, что происходит с двумя по виду одинаковыми санями, одни из которых пускают вниз по склону, а другие оставляют на горизонтальном участке того же холма. Первые сани, спустя некоторое время, окажутся у подножья, а вторые никогда туда не попадут; причина не в санях, а в различных точках начала движения.

Так в чем же состоят доказательства «тождественности» электрона и μ-мезона? Об этом свидетельствует большое число экспериментальных данных, и мы остановимся здесь на трех из них. Первое связано

со способами распада π-мезона. Например, положительный π-мезон может окончить свою жизнь одним из двух способов:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^+ \to e^+ + \nu_e.$$

Из большого числа π-мезонов 99,986% превратятся в положительный μ-мезон и нейтрино и лишь 0,014% — в позитрон и нейтрино. Столь явное предпочтение первого способа распада заставило долгое время считать, что π-мезоны вообще *не распадаются* на электроны. Если бы это оказалось так, то тем самым были бы серьезно подорваны устои представления об электроне и μ-мезоне как о частицах-близнецах. К счастью, редкий электронный распад π-мезона был обнаружен в 1958 г., и это подкрепило веру в то, что электрон и μ-мезон (вместе с соответствующими нейтрино) действительно сходны во всем, кроме массы.

Согласно современному варианту теории Ферми слабых взаимодействий, вероятности распада π-мезона на μ-мезон и электрон должны быть пропорциональны, кроме всего прочего, *разности* скорости света и скорости рождающейся частицы:

$$c - v,$$

где c — скорость света, а v — скорость μ-мезона или электрона. Далее, при обычном способе распада π-мезона μ-мезон оказывается довольно быстрым. Он улетает из точки своего рождения со скоростью, равной примерно $^1/_7$ скорости света. Но если π-мезону вздумается распасться вместо этого на электрон, то эта более легкая частица потребует значительно большей скорости, в действительности составляющей свыше 99% от скорости света. Таким образом, в случае электрона *разность* $c - v$ будет значительно меньше, чем в случае более тяжелого неторопливого μ-мезона. В результате вероятность распада π-мезона на электрон будет гораздо меньше вероятности распада на μ-мезон.

Предпочтение, отдаваемое π-мезоном распаду на более тяжелую, медленную частицу, а не на легкую и более быструю, можно рассматривать как простую причуду математического аппарата теории слабых

взаимодействий. Важно то, что эта причуда математики полностью объясняет наблюдаемое на опыте преобладание распада на μ-мезон. Чтобы объяснить большую разницу в частоте распада π-мезона этими путями, нет нужды учитывать различия между μ-мезоном и электроном, кроме различия в массах. Пока не был обнаружен этот редкий, но важный способ распада π-мезона на электрон, казалось, что между μ-мезоном и электроном существует «истинное» различие. Более того, в этом случае было устранено необъяснимое исключение из правила, что природа делает все, что ей не запрещают законы сохранения.

Одна из основных обязанностей электрона — создание атомов. Атом водорода содержит один электрон, атом гелия — два, и так вплоть до атома урана с его 92 электронами. Если μ-мезоны и электроны в основном идентичны, то должна существовать возможность построения атомов как с электронами, так и с μ-мезонами. Это действительно так, но дается отнюдь не легко. Физик, пытающийся построить атомы с μ-мезонами, похож на художника, пытающегося завершить картину с помощью красок, которые совершенно выцветают через мгновение. Пока он успеет нанести новый цвет, предыдущий уже исчезнет. Даже если он будет работать с быстротой молнии, ему удастся завершить в одном цвете лишь весьма примитивный рисунок. Физику, работающему буквально с быстротой молнии, т. е. в миллионные доли секунды или быстрее, удается построить некоторое количество простых μ-мезонных атомов (μ-мезоатомов) и исследовать их на протяжении одного мгновения, пока распад μ-мезона не положит предел их существованию. Изучение таких μ-мезоатомов дало важные результаты, подкрепляющие представление о μ-мезоне и электроне как о близнецах.

Задача состоит в получении достаточного количества μ-мезонов одновременно в одном и том же месте. Если пучок μ-мезонов падает на мишень, то часть атомов вещества мишени может захватить μ-мезон, и начнется процесс превращения электронного атома в μ-мезоатом. Но прежде чем атому удается захватить второй μ-мезон, первый уже успеет исчезнуть. До сих пор физики вынуждены были довольство-

ваться атомами с единственным μ-мезоном, подобно тому как художник довольствовался одноцветным рисунком. Но даже в этих условиях удавалось получить важные данные.

Важной особенностью μ-мезоатома являются его малые размеры, примерно в 200 раз меньшие, чем у электронного атома. Это происходит по двум причинам, связанным с волновой природой вещества, которая обсуждалась в предшествующих главах. Первая причина относится к соотношению де-Бройля, которое утверждает, что чем больше импульс, тем короче длина волны. По отношению электрона μ-мезон находится в таком же положении, как грузовик по отношению к легковой автомашине. При одинаковой скорости более тяжелый предмет будет иметь больший импульс. Поскольку μ-мезон и электрон в атоме имеют примерно одну и ту же скорость, импульс μ-мезона будет значительно больше, а длина волны — гораздо короче. Второе обстоятельство состоит просто в том, что размеры атома определяются длиной волны его электронов (или μ-мезонов). Частицу нельзя загнать в область пространства размером меньше ее собственной длины волны. Итак, когда μ-мезон присоединяется к обычному атому, он шаг за шагом переходит на орбиты меньшего размера, вскоре оказывается внутри наименьшей электронной орбиты и в конечном итоге переходит в состояние движения с самой низкой энергией. В этом состоянии он циркулирует по крошечной орбите вокруг ядра, находящейся в 200 раз ближе к ядру, чем ближайшая электронная орбита.

Последовательно перескакивая с орбиты на орбиту на пути к ядру, μ-мезон испускает фотоны, изучение которых дает нам сведения как о самом μ-мезоне (особенно о точном значении его массы), так и о форме и размерах ядра, находящегося в центре атома.

Примостившись на самой низшей орбите (которой он достигает гораздо быстрее, чем за миллионную долю секунды), μ-мезон мог бы заняться тем, что он должен делать так или иначе, т. е. распасться на электрон, нейтрино и антинейтрино, с большой скоростью улетающие прочь. Однако для μ-мезона не закрыта и другая возможность, которой он следует тем охотнее, чем больше размеры ядра, к которому

он присоединился. Он может соединиться с одним из протонов в ядре, в результате чего образуются нейтрон и нейтрино:

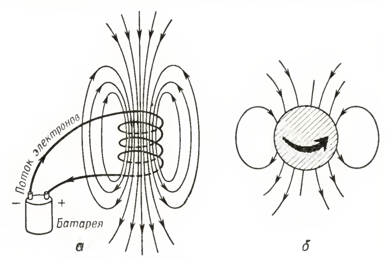
$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu.$$

Эта реакция происходит в согласии со всеми законами сохранения и сопровождается выделением энергии примерно 100 *Мэв*. Часть этой энергии уносится нейтрино, остальная расходуется на разрушение ядра. У некоторых искусственно созданных радиоактивных атомов происходит аналогичный процесс захвата электронов. При этом внутренний электрон жадно поглощается ядром, протон превращается в нейтрон и возникает электронное нейтрино. (Этот тип радиоактивности случайно оказался самым безобидным. Единственной частицей, вылетающей из ядра, оказывается нейтрино, которое никому не причиняет вреда.)

Сравнение процессов захвата μ-мезона и электрона дает еще одно доказательство того, что μ-мезон и электрон различаются только массой. В остальном они захватываются совершенно одинаково.

Но наиболее яркой демонстрацией эквивалентности μ-мезона и электрона до последнего времени служили измерения врожденного магнетизма этих частиц. Большинство школьников знает, что, обмотав проводом железный гвоздь и присоединив концы этого провода к сухому элементу, можно получить настоящий маленький электромагнит (фиг. 25). Электроны, протекая по проволочной обмотке, создают магнитное поле (которое усиливается железным гвоздем). Насколько нам известно, *все* магнитные явления в основном возникают таким же путем — благодаря вращению или циркуляции электрического заряда. Это представление в одинаковой мере справедливо как в микромире, так и в макромире, как для отдельной элементарной частицы, так и для проволоки и железного гвоздя. Каждая элементарная частица, вращающаяся вокруг своей оси (например, электрон или μ-мезон), представляет собой электрический заряд, совершающий вращательное движение, и потому каждая такая частица — это крошечный электромаг-

нит. Современные методы позволяют измерять величину этих элементарных магнитов с удивительной точностью.



ФИГ. 25. *Магниты в макромире и микромире.*

а — магнитные линии обмотки с током; *б* — идеализированная картина электрона как вращающегося шара. В обоих случаях источником магнетизма является циркуляция, или вращение электрических зарядов.

В частности, измерения величины магнитного момента электрона в единицах, называемых магнетоном Бора [1]), дали следующий результат:

1,0011596.

Магнитный момент μ-мезона в единицах соответствующего магнетона равен

1,001162.

Эти цифры выписаны не потому, что они особенно важны сами по себе, а поскольку число значащих

[1]) Магнетон равен $eh/4\pi mc$, т. е. произведению элементарного заряда на постоянную Планка h, деленному на произведение 4π на массу частицы и скорость света. Магнетон оказался удобной единицей измерения, ибо он равен величине магнитного момента частицы, которая подчиняется просто классическим законам электромагнетизма и имеет спин, равный $^1/_2$.

цифр характеризует чрезвычайно высокую точность измерений. Ошибка в величине магнитного момента μ-мезона эквивалентна ошибке в годовом отчете, которая получается, когда итог в 10 тысяч долларов не сходится на 5 центов. Напомним, что эти точные измерения были проведены за 1 миллионную долю секунды. Величина магнитного момента электрона известна еще более точно, так что ошибка здесь уже менее 1 цента на 100 тысяч долларов.

Величины магнитных моментов этих частиц существенны еще по другой причине. Они принадлежат к немногим измеренным на опыте характеристикам мира элементарных частиц, которые можно точно рассчитать теоретически, т. е. получившим свое объяснение. Созданная Дираком квантовая теория электрона (в 1928 г.) в соединении с максвелловской теорией электромагнетизма и теорией фотонов позволила построить теорию, которая дала описание электрических и магнитных свойств электрона (очевидно, и μ-мезона) и получила сложное наименование квантовой электродинамики. На протяжении 20 лет эту теорию отягощали математические трудности, прояснившиеся лишь в 1948 г.[1]) После этого удалось рассчитать теоретически ожидаемое значение магнитного момента электрона, который оказался равным

$$1,0011596.$$

Предполагая, что μ-мезон отличается от электрона только массой, была получена следующая величина магнитного момента μ-мезона:

$$1,001165.$$

В пределах ошибок эксперимента эти величины согласуются с измеренными на опыте. Вследствие высокой точности измерений эти результаты обеспечи-

[1]) В действительности квантовая электродинамика содержит и сейчас ряд математических трудностей. В 1948 г. удалось преодолеть ряд преград, стоявших на пути прогресса теории, что позволило выполнить точные расчеты ряда характеристик μ-мезона и электрона. Однако в целом теория страдает еще рядом недостатков. И маловероятно, чтобы они исчезли из теории в ее нынешней форме в ближайшие десятилетия.

вают прекрасную проверку представления о том, что электрон и μ-мезон — близнецы.

Магнитные моменты μ-мезона и электрона можно вычислить столь точно потому, что эти частицы не участвуют в сильных взаимодействиях, а слабые взаимодействия заметно не влияют на магнитные свойства частиц. В игре участвуют только электромагнитные взаимодействия, которые из взаимодействий четырех типов известны лучше всего.

Большинству физиков загадка μ-мезона доставляет танталовы муки. Так много известно о сходстве электрона и μ-мезона и так мало о причинах громадного различия их масс! С помощью этих частиц, свободных от осложнений, вносимых сильными взаимодействиями, природа пытается открыть нам на что-то глаза, но на что — мы не знаем. Один из ведущих физиков-теоретиков, занимавшийся этими проблемами, Абдус Салам сказал: «Я полагаю, что наши современные теории — это всего лишь ступени, ведущие к внутренней гармонии, всеобъемлющей симметрии. Сегодня μ-мезон может показаться лишним. Однако, открыв его истинную природу, мы придем в восхищение от того, сколь гармонично он укладывается в общую схему, сколь неотъемлемой частью чего-то более глубокого, более значительного и более совершенного он является. Вера во внутреннюю гармонию природы в прошлом приносила свои плоды. Я уверен, что так будет и в будущем».

π-мезоны и нуклоны

Единственный в своем роде пример частицы, ожидавшейся заранее теоретиками, — это π-мезон. Большинство частиц сначала было открыто, а уж затем, если это вообще произошло, получили свое «объяснение». Однако π-мезон был предсказан Юкавой более чем за 10 лет до его обнаружения.

После того как в 1932 г. к протону, известному уже с начала века, присоединился нейтрон, физики немедленно пришли к выводу, что атомные ядра должны быть построены из протонов и нейтронов. Теперь мы знаем, что эти обе частицы, известные под общим

наименованием нуклоны, имеют нечто более общее, чем то, что они служат кирпичами, из которых построено ядерное вещество. У них почти одинаковые массы, и они, по-видимому, ведут себя одинаково во всех отношениях, за исключением электрического поля. Здесь они оказываются в таком же положении друг относительно друга, как положительный и нейтральный π-мезоны или как электрон и нейтрино. Попросту говоря, протон есть не что иное, как заряженный нейтрон (или нейтрон — это лишенный электрического заряда протон).

Можно сказать, что открытие сильных взаимодействий совпало с открытием нейтрона, ибо, как только появилась идея о том, что ядра — это скопища нуклонов, сразу же стало ясно, что должны существовать силы нового типа — ядерные силы, обладающие двумя важными особенностями: эти силы должны значительно превосходить электрические (поскольку они удерживают протоны в ядре, несмотря на электрическое расталкивание последних); кроме того, они должны действовать только на очень малых расстояниях, не более 10^{-12} *см* (поскольку не существует ядер больших размеров и влияние ядер на пролетающие частицы не выходит за эти пределы). В 1935 г. Юкава выдвинул гипотезу о существовании π-мезона, частицы, обмен которой обеспечивает связь между нуклонами. Эта гипотеза была предназначена главным образом для объяснения последней особенности ядерных сил, а именно их малого радиуса действия.

Мы должны задержаться теперь на очень важном моменте современных представлений о свойствах микромира, на идее «виртуальных частиц». Эта идея служит чрезвычайно ярким примером проявления принципа Гейзенберга в элементарных процессах и содержит ключ к пониманию природы не только сильных взаимодействий, но и всех остальных сил и взаимодействий.

В том виде, в каком принцип Гейзенберга был записан в главе третьей, он выглядел следующим образом:

$$(\Delta x)(\Delta p) = \hbar.$$

Произведение неопределенности положения частицы (Δx) и ее импульса (Δp) равно постоянной Планка $\hbar$. Но в действительности этот фундаментальный принцип природы, обусловленный волновыми свойствами частиц, проявляется не только в связи с измерением координаты и импульса. Существует еще одно проявление неопределенности в природе, которое можно записать в виде

$$(\Delta t)(\Delta E) = \hbar.$$

Произведение неопределенности во времени (Δt) и неопределенности в энергии (ΔE) также равно постоянной Планка $\hbar$. Это означает, что точное измерение энергии (малое ΔE) требует продолжительного времени (большое Δt). Или, если событие происходит в точно известный момент времени (Δt мало), его энергию не удастся точно определить (ΔE велико). Время и энергию никогда не удастся знать точно в одно и то же время. В частности, для проверки законов сохранения энергии необходимы процессы, длящиеся на протяжении некоторого времени.

Наличие двух различных форм принципа неопределенности не вызовет удивления, если вспомнить, что, согласно теории относительности, существует тесная связь пространства и времени, энергии и импульса. В основе обеих форм этого принципа лежит волновая природа вещества. Подобно тому как волну нельзя локализовать в области пространства, размеры которой меньше ее собственной длины волны, точно так же ее нельзя зафиксировать на протяжении интервала времени короче периода ее колебаний.

Единственный способ, которым можно втиснуть волну в меньшие размеры, состоит в укорочении длины волны, а единственный способ уменьшить длительность волны состоит в укорочении ее периода, т. е. волну нужно заставить колебаться быстрее. Но чем выше частота колебаний, тем больше энергия. Таким образом, более точно определенное время должно сопровождаться более высокой энергией. В музыке для получения чистого тона, свободного от обертонов, необходимо, чтобы произошло большое число колеба-

ний. Аналогичным образом единственный путь получения «чистой» энергии, т. е. точно заданной, без неопределенностей, состоит в том, чтобы дать возможность соответствующей частице-волне совершать многочисленные колебания на протяжении длительного времени, т. е. допустить большую неопределенность во времени. Волновые свойства вещества непосредственно приводят к неопределенности во времени и энергии точно так же, как и к неопределенности в координате и импульсе.

Прежде чем применить принцип неопределенности в этом новом виде к ядерным силам, мы несколько забежим вперед и познакомимся с одним фактом, относящимся к взаимоотношению между π-мезонами и нуклонами. Типичный процесс рождения π-мезона на ускорителе символически может быть записан в виде

$$p+p\rightarrow p+n+\pi^{+}.$$

Протон с высокой энергией сталкивается с другими протонами, покоящимися в мишени, в результате чего возникают протон, нейтрон и положительный π-мезон. Простейшее объяснение этого события состоит в том, что один из протонов расщепляется на нейтрон и π^{+}-мезон:

$$p\rightarrow n+\pi^{+}.$$

Такой процесс удовлетворяет всем законам, кроме одного — сохранения энергий. Сумма масс нейтрона и π^{+}-мезона значительно превышает массу протона, так что изолированный свободный протон, предоставленный самому себе, никогда бы не распадался таким путем. Идя на это, он вынужден был бы нарушить закон сохранения энергии. Если же он сталкивается с другим протоном, несущим большую энергию, то часть этой энергии движения может израсходоваться в процессе столкновения на образование собственной энергии (массы), и процесс будет разрешенным. Необходимая дополнительная энергия черпается в столкновении. Наше представление о событии весьма похоже на это. У протона имеется «желание» превратиться в нейтрон и положительный π-ме-

зон. Возможность такого превращения всегда открыта благодаря сильному взаимодействию между нуклонами и π-мезонами. Однако превращение не может произойти, пока нет дополнительной энергии. Протон похож на автомашину, стоянка которой расположена на возвышенности. Закон сохранения энергии — это тормоз, удерживающий протон на стоянке. В столкновении, происходящем при высокой энергии, тормоза освобождаются и протон получает возможность последовать своему естественному желанию.

Эти факты об образовании π-мезонов не были известны Юкаве, однако он предвосхитил их. Его дальнейшие рассуждения, если перевести их с математического языка, звучали бы следующим образом: хотя закон сохранения энергии и препятствует тому, чтобы превращение типа

$$p \rightarrow n + \pi^{+}$$

происходило реально и необратимо, принцип неопределенности делает закон сохранения энергии более снисходительным. В результате такое превращение становится возможным на короткий промежуток времени. Мы могли бы сказать, что полицейский, стоящий на страже закона сохранения энергии, выражает готовность отвернуться в сторону, если нарушение происходит в достаточно короткое время. Нарушителю π-мезону удается молниеносно удрать из заточения в нуклоне и вернуться обратно, прежде чем будут предприняты против него какие-то меры.

Разговор о снисходительности и принуждении связан с принципом неопределенности:

$$(\Delta t)(\Delta E) = \hbar.$$

Если мы хотим «нарушить» закон сохранения энергии, т. е. внести в энергию неопределенность ΔE, то мы можем это сделать при условии, что продолжительность этого нарушения Δt не превысит установленную принципом неопределенности. Численное значение $\hbar$ равно $7 \cdot 10^{-22}$ *Мэв · сек.* Величина избытка энергии, необходимая для превращения протона в нейтрон и π^{+}-мезон, грубо говоря, эквивалентна массе

π^+-мезона, или 140 *Мэв*. Разрешенная продолжительность столь большой неопределенности в энергии равна

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E}.$$

Деля численное значение $\hbar$ на численное значение ΔE, мы получим неопределенность во времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-24}$ *сек*, действительно очень короткий промежуток времени! Насколько далеко удастся уйти за это время получившему свободу π-мезону? Двигаясь так быстро, как только он способен (т. е. почти со скоростью света), π-мезон отойдет всего лишь на $1{,}5 \cdot 10^{-13}$ *см*.

И вот, по мнению Юкавы, протон вместо того, чтобы быть просто недвижимым, как бы застывшим предметом, даже в состоянии полного одиночества все время проявляет свою активность. Он может испускать, а затем сразу же (спустя $5 \cdot 10^{-24}$ *сек*) поглощать положительный π-мезон:

$$p \rightleftarrows n + \pi^+.$$

Двойная стрелка характеризует двойственную природу процесса. Возможно испускание и поглощение нейтрального π-мезона:

$$p \rightleftarrows p + \pi^0.$$

Поскольку в основе этой активности лежат сильные взаимодействия, указанные выше процессы происходят много раз, и протон следует рассматривать как источник неиссякающей активности. Вызываемые на мгновение к жизни π-мезоны называют «виртуальными». Это не «реальные» π-мезоны, ибо закон сохранения энергии препятствует их освобождению, и они никогда не смогут умчаться прочь, чтобы оставить свой след в камере Вильсона или дать о себе знать каким-либо другим путем. Тем не менее успех теории Юкавы заставил нас поверить в то, что протон «устроен» именно так. Подобно пешеходу, ведущему по тротуару непослушную свору французских пуделей, протон окружен облаком виртуальных π-мезонов,

снующих туда и сюда, но удерживаемых, как поводком, принципом неопределенности в пределах расстояния 10^{-13} *см* от сердцевины нуклона.

В последние годы эта модель протона получила значительную поддержку благодаря серии опытов по «рассеянию электронов», которые были проведены в Стэнфордском университете Робертом Хофштадтером [1]). Электроны с энергией в несколько сотен *Мэв* направлялись на мишень, которая содержала протоны. Некоторые из этих электронов проходили через сам протон, т. е. облако виртуальных π-мезонов, окружающих сердцевину протона. При этом они отклонялись: некоторые на малый угол, а совсем немногие на большие углы. Детальное исследование числа электронов, вылетающих в различных направлениях, позволяет получить сведения о размерах и составе π-мезонного облака. Виртуальные мезоны проникают на несколько иное расстояние, нежели 10^{-13} *см*, которое следовало из наших расчетов, основанных на принципе неопределенности. Среднее удаление π-мезонов от сердцевины нуклона составляет 0,8 *ферми*, или $0{,}8 \cdot 10^{-13}$ *см*. (В действительности облако вокруг протона содержит и K-мезоны, и некоторое количество других частиц, однако построено оно главным образом из π-мезонов.)

Заключительный этап рассуждений Юкавы относился к силам, действующим между двумя нуклонами. Единственное требование принципа неопределенности состоит в том, чтобы каждый виртуальный π-мезон в окружающем протон облаке исчезал почти немедленно после своего рождения, дабы рассеять наши сомнения относительно этого избытка собственной энергии. Если нуклон оказался в одиночестве, то π-мезон должен поглотиться тем же нуклоном, который его испустил. Но если поблизости друг от друга находятся два нуклона, то π-мезон может быть испущен одним, а поглощен другим нуклоном. Допустим,

[1]) За свою работу по исследованию структуры нуклонов Хофштадтер был удостоен Нобелевской премии по физике за 1961 г. (Он поделил эту премию с Рудольфом Мёссбауером, который открыл явление, позволившее измерить влияние силы тяжести на фотоны; об этом упоминалось на стр. 201.)

что нейтрон вплотную приблизился к протону. В некоторый момент времени протон может мгновенно превратиться в нейтрон и положительный π-мезон. Другой нейтрон может поглотить π-мезон и стать протоном. В конечном результате π-мезон перескочит от протона к нейтрону, и обе частицы поменяются ролями. Юкава считал, что такого рода обмен π-мезоном мог бы явиться причиной возникновения сильного притяжения между двумя нуклонами, т. е. быть причиной силы, которую сейчас называют *обменной*. Можно думать, что внутри ядра непрерывно появляются и исчезают виртуальные π-мезоны, часто переходящие от одного нуклона к другому, и наоборот. И это непрекращающееся жонглирование π-мезонами (а в меньшей степени и *K*-мезонами) обеспечивает ядерные силы, скрепляющие воедино протоны и нейтроны.

Поскольку радиус ядерных сил был грубо известен, Юкаве удалось предсказать примерное значение массы π-мезона. Чем тяжелее виртуальная частица, тем серьезнее нарушение закона сохранения энергии и поэтому тем более мимолетным может быть ее существование. Частица не может двигаться быстрее света, поэтому короткоживущие виртуальные частицы будут уходить на меньшие расстояния от родительской частицы и создавать вокруг нее более компактное облако. Чтобы почувствовать обменную силу, действующую со стороны нуклона, другому нуклону придется подойти к краю облака виртуальных частиц. Таким образом, радиус сил будет примерно совпадать с размерами облака. Виртуальные частицы тяжелее π-мезона будут ответственны за силы с еще меньшим радиусом действия. Виртуальные частицы легче π-мезона будут создавать силы с большим радиусом действия.

Представление о мимолетном рождении виртуальных частиц помогает объяснить введенную в начале этой главы концепцию возникновения массы изолированной частицы из «взаимодействий», даже если вблизи от частицы нет других взаимодействующих с ней частиц. В действительности ни одна частица, даже совсем изолированная, не пребывает в полном покое. Частица всегда «взаимодействует», поскольку

вокруг нее всегда возникает и исчезает облако виртуальных частиц. Этот процесс «самодействия» вносит вклад в массу частицы, ибо частица, очевидно, представляет собой локализованный сгусток энергии, который есть не что иное, как масса. Участвующие в сильных взаимодействиях π-мезон и все более тяжелые частицы, по-видимому, окружены наиболее плотным облаком виртуальных частиц и соответственно имеют наибольшую собственную энергию или массу. Те частицы, которые не участвуют в сильных взаимодействиях (μ-мезон и более легкие частицы), имеют слабое самодействие и малые массы.

Несмотря на наличие некоторого качественного понимания причин происхождения массы, современная картина еще далека от идеала. Прежде всего до сих пор не удавалось получить теоретического значения массы любой частицы. Более того, из некоторых теорий следует, что большее самодействие должно приводить к *уменьшению* массы, что противоречит эксперименту. Кроме того, как уже подчеркивалось, масса μ-мезона не укладывается в рамки даже качественной картины. Проблема масс элементарных частиц, безусловно, еще далека от окончательного решения.

Нам следует вкратце упомянуть еще одно обстоятельство, относящееся к нуклонам, не потому, что оно иллюстрирует какие-либо новые идеи или обнаруживает существующие ограничения, а вследствие его огромного практического значения. Речь идет о приобретении нейтроном устойчивости. Если бы нейтрон не становился в присутствии одного или нескольких протонов стабильным, окружающий нас мир содержал бы не 92 встречающихся в природе элемента, а только один — водород. Одинокий нейтрон испытывает β-распад и по прошествии в среднем 17 *мин* превращается в протон, электрон и антинейтрино. Но соединившись с протоном, он обретает бессмертие и обеспечивает построение всех элементов тяжелее водорода. Если бы это все происходило не так, то все элементы давным давно превратились бы в самый легкий элемент — водород.

Нейтрон обретает устойчивость в силу особого «случая», который состоит в том, что сила, возни-

кающая в результате обмена π-мезоном между протоном и нейтроном, оказывается несколько больше аналогичной силы, действующей между двумя протонами. Ядро дейтерия, или тяжелого водорода, состоит из одного протона и одного нейтрона. Масса этой комбинации (т. е. дейтрона) не просто равна сумме масс протона и нейтрона, а несколько меньше нее. Сила притяжения, удерживающая вместе протон и нейтрон, приводит к выделению энергии, и эта потерянная частицами энергия, называемая «энергией связи», находит свое отражение в уменьшении массы дейтрона. Далее, у нейтрона, входящего в состав дейтрона, имеется врожденная склонность к β-распаду. Обычно этот процесс разрешен законом сохранения энергии, ибо нейтрон превращается в более легкий протон. Если и нейтрон в дейтроне решит поступить в соответствии со своим желанием, то в дейтроне внезапно появится пара протонов. Но эти протоны будут связаны друг с другом слабее, нежели нейтрон с протоном; их энергия связи меньше. Выигрыш в энергии при переходе от более тяжелого нейтрона к более легкому протону оказывается меньше потерь в энергии связи. Таким образом, распаду нейтрона воспрепятствует закон сохранения энергии. Нейтрон черпает свою стабильность в энергии связи его с протоном. Речь идет об очень тонком балансе, так как стабилизация нейтрона соответствует изменению его массы менее чем на 1/1000. И все же мы должны быть признательны за это весьма странное стечение обстоятельств: что нейтрон лишь чуть-чуть тяжелее протона и что π-мезонам удается связать нейтрон и протон чуточку сильнее, нежели два протона. В свете современных представлений о взаимодействиях элементарных частиц кажется поистине чудом, что природа вместо одного получила в свое распоряжение 90 различных кирпичей мироздания.

Странные частицы

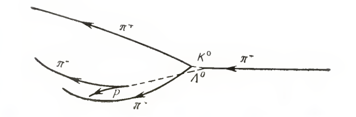
В 1947 г. список известных элементарных частиц (если считать «известным» одно нейтрино и не считать гравитона) насчитывал 14 экземпляров. Самые

мощные в мире ускорители разгоняли в то время протоны до энергии около 200 *Мэв*. Главным источником частиц высоких энергий для экспериментальных исследований оставались космические лучи, а основным инструментом в исследованиях частиц была камера Вильсона. Спустя восемь лет список элементарных частиц возрос до 30. В Беркли было завершено строительство Беватрона, предназначенного для ускорения протонов до энергии 6000 *Мэв* (6 *Гэв*). Центр тяжести в физике элементарных частиц переместился от исследований в космических лучах к исследованиям на ускорителе; была изобретена пузырьковая камера, совершенно новый прибор для изучения элементарных частиц.

На протяжении этих восьми лет на сцене появились 16 новых частиц, принадлежавших к четырем группам: K-мезоны, Λ-, Σ- и Ξ-частицы. Все они заранее не были предсказаны и оказались неожиданными и «странными». Физики в изумлении пожимали плечами и мысленно готовили себя к открытию новых и новых частиц. Но их поток иссяк так же внезапно, как и появился. Начиная с 1955 г. не было обнаружено ни одной сильно взаимодействующей и «долгоживущей» частицы, кроме η^0 и Ω^-[1] (со временем жизни свыше примерно 10^{-10} *сек*), а благодаря классификации частиц, открытой в 1953 г. независимо двумя молодыми физиками, двадцатитрехлетним Мюрреем Гелл-Манном в США и двадцатишестилетним Казихико Нишиджима в Японии, появились основания думать, что остались неизвестны (если вообще они еще остались) очень немногие.

Новые частицы впервые дали о себе знать в виде необъяснимых V-образных следов на фотографиях, полученных в камере Вильсона физиками Манчестерского университета Дж. Рочестером и К. Батлером. На фиг. 26 показана более поздняя фотография такого V-образного следа. След входящего π-мезона

[1]) Точнее следует сказать, что с 1955 г., кроме η^0 и Ω^-, не было открыто новых *типов* долгоживущих сильно взаимодействующих частиц, поскольку остальные частицы известных типов, как Ξ^0 или анти-Λ, были надежно обнаружены лишь в более поздние годы.



ФИГ. 26. *Пример V-образных следов, характеризующих распад «странных частиц».*

В точке *B* нейтральиая Λ-частица распадается иа протои и отрицательиый π-мезои. В точке *C* нейтральиый *K*-мезои распадается иа π-мезоиы с противоположиыми зарядами. В точке *A* отрицательиый π-мезои, движущийся в пузырьковой камере справа иалево, соударяется с протоиом, в результате чего возиикают две страииые частицы:

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0.$$

внезапно обрывается в камере, и на расстоянии нескольких сантиметров от него видны два следа, образующих вилку, вершина которой направлена к концу следа π-мезона (точка A на снимке). Измерение импульсов частиц, оставивших видимые следы, позволило установить, что в точке A произошло рождение двух нейтральных частиц, которые в точках B и C распались на пары противоположно заряженных частиц, и следы их имеют V-образный характер.

Обычно камеры Вильсона и пузырьковые камеры помещаются в магнитные поля, чтобы движущиеся заряженные частицы отклонялись и оставляли искривленные следы. На фиг. 26 отрицательно заряженные частицы, движущиеся влево, заворачиваются вверх, а положительно заряженные частицы — вниз. Частица с большим импульсом типа падающего π-мезона (в правой части снимка) слабо отклоняется от прямолинейного пути. Частица с меньшим импульсом типа отрицательного π-мезона, образующегося при распаде K-мезона, отклоняется сильнее. Измеряя кривизну следов, экспериментатор может определить импульс каждой из заряженных частиц. Благодаря закону сохранения импульса он может найти отсюда импульс невидимой нейтральной частицы.

Немедленно после открытия в 1947 г. в Манчестере V-частиц подобные следы были обнаружены и другими экспериментаторами, и вскоре после этого тщательные измерения, выполненные в ряде лабораторий, позволили установить свойства этих новых частиц. Теперь известно, что среди впервые обнаруженных V-частиц были нейтральные K-мезоны и Λ-частицы, подобные показанным на фиг. 26, которые распадались по схеме

$$K^0 \to \pi^+ + \pi^-,$$
$$\Lambda^0 \to p + \pi^-.$$

На протяжении нескольких лет были обнаружены заряженные собратья этих частиц, и список пополнился Σ- и Ξ-частицами (характерный V-образный след отрицательной Ξ-частицы показан на фиг. 8, стр. 39).

Не успело изучение новых частиц дать существенные результаты, как выяснились странные обстоятельства. Хотя за время долголетних исследований с камерами Вильсона эти частицы не были замечены, в действительности-то они оказались не столь уж редкими. В ядерных столкновениях, происходящих при очень высоких энергиях, вероятность образования одной из новых частиц была столь значительна, что не оставалось иного выхода, как причислить новые частицы к разряду сильно взаимодействующих, подобно π-мезонам и нуклонам. Частицы, участвующие лишь в электромагнитных и (или) слабых взаимодействиях, не смогли бы рождаться столь часто, как новые частицы. Переводя все в единицы времени, получим, что при наличии достаточной энергии рождение новой частицы могло бы произойти спустя всего лишь 10^{-22} *сек.* Но родившись, эти частицы живут в миллион миллионов раз дольше, т. е. около 10^{-10} *сек.* Это, утверждали физики, очень странно. И новые частицы стали называть «странными».

Большие времена жизни π- и μ-мезонов понятны, так как они распадаются на частицы, испытывающие лишь слабые взаимодействия. Но при распаде, например, Λ-частицы

$$\Lambda^0 \to p + \pi^-$$

продукты распада, протон и π^--мезон, участвуют в сильном взаимодействии, как и сама Λ-частица, о чем свидетельствует та легкость, с которой эта частица может рождаться. Очень трудно понять, что́ заставляет Λ-частицу так долго оставаться в живых. Ведь она не использует сильные взаимодействия, чтобы немедленно превратиться в протон и π-мезон.

Электрон вечен в силу закона сохранения заряда. Протон бессмертен по закону сохранения барионного заряда. Допустим, рассуждали Гелл-Манн и Нишиджима, что существует новый закон сохранения, заставляющий Λ-частицу жить «почти вечно». Это означало, что должна оставаться постоянной или сохраняться новая физическая величина, некая новая «вещь». Эта новая сохраняющаяся величина была не без ехидства названа «странностью».

Согласно Гелл-Манну и Нишиджиме, каждая частица имеет определенную странность, подобно тому как она имеет электрический, лептонный или барионный заряд. Нуклон и π-мезон не принадлежат к странным частицам; их странность равна нулю, Λ- и Σ-частице приписана странность -1 (а их античастицам $+1$), K-мезон имеет странность $+1$, а Ξ-частица — странность -2 (странности их античастиц имеют противоположные знаки).

Все это звучит довольно фантастично, но тем не менее в этом есть смысл! В связи с отсутствием более глубоких представлений введение странности позволяет охарактеризовать свойства странных частиц. В этом случае закон сохранения гласит следующее. В каждом процессе с участием сильных взаимодействий странность сохраняется.

В процессе рождения π-мезона, например

$$p + p \to n + n + \pi^+,$$

выполняется новый закон сохранения, так как суммарная странность равна нулю как до, так и после столкновения. Ну а если рождается странная частица? Это возможно только в том случае, если одновременно рождаются по крайней мере *две* частицы с противоположными по знаку странностями. Типичный разрешенный процесс таков:

$$p + p \to p + \Lambda^0 + K^+.$$

Странность двух соударяющихся протонов равна нулю. Странности Λ^0-частицы (-1) и K^+-мезона $(+1)$ взаимно уничтожаются, и суммарная странность сохраняется равной нулю. Это явление, названное «ассоциативным рождением», впервые было предсказано Абрахамом Пайсом незадолго до появления схемы Гелл-Манна и Нишиджимы. Имеются обширные экспериментальные доказательства того, что странные частицы всегда рождаются парами (или в большем числе). Этого не заметили сразу, поскольку одна из компонент пары часто покидала камеру Вильсона, не будучи зарегистрированной, и физики замечали лишь одну из странных частиц. На фиг. 26 приведен нагляд-

ный пример ассоциативного рождения, а на фиг. 27 показан еще один интересный пример этого явления.

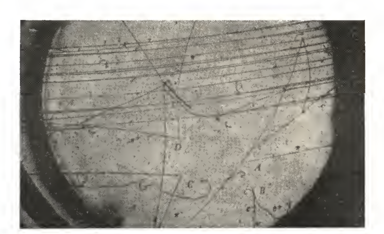
Рождение Ξ-частицы со странностью —2 обычно сопровождается появлением двух странных частиц, например двух K-мезонов:

$$p + p \rightarrow \Xi^0 + p + K^0 + K^+.$$

Если странная частица соударяется с нуклоном, то и в этом случае закон сохранения странности ограничивает происходящее. Типичный разрешенный процесс таков:

$$\Lambda^0 + p \rightarrow n + p + \overline{K^0}.$$

В результате соударения с протоном Λ^0-частица исчезает, но, чтобы сохранилась полная странность —1,



ФИГ. 27. *Ассоциативное рождение Σ-частицы и K-мезона.*

В точке A движущийся справа налево отрицательный π-мезон соударяется с протоном, в результате чего рождаются две странные частицы — Σ^0 и K^0:

$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^0 + K^0.$$

Σ^0-частица живет слишком короткое время, чтобы отойти на измеримое расстояние от точки A, и почти мгновенно распадается на Λ-частицу и фотон ($\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$). Фотон движется вниз и в точке B образует пару электрон — позитрон. Нейтральная Λ-частица и нейтральный K-мезон распадаются в точках C и D, оставляя характерные V-образные следы. Некоторые отрицательные π-мезоны, пролетающие через камеру справа налево, тоже вызывают рождение частиц.

должна родиться другая странная частица, в данном случае анти-K^0-мезон. На фиг. 8 была показана реакция

$$\overline{K^+} + p \to K^+ + \Xi^-.$$

Читатель может сам проверить сохранение странности в этом случае (напомним, что электрический заряд и странность античастицы K^+ противоположны соответствующим характеристикам $\bar{K}^+$).

Как видно из этих примеров, понятие странности выходит за рамки шутки. Роль нового закона сохранения, как и каждого подобного закона, заключается в том, что он что-то запрещает. Имеется обширный круг процессов с участием сильных взаимодействий, которые запрещены только законом сохранения странности. Ни один из этих процессов до сих пор не был обнаружен. Не может быть сомнений в том, что, каким бы не оказался сокровенный смысл понятия странности, она служит важной характеристикой частиц, значительно ограничивающей их возможные превращения.

Что же должно следовать из закона сохранения странности относительно распадов странных частиц? В качестве простейшего примера рассмотрим K-мезон. Это самая легкая из странных частиц (подобно тому как электрон — легчайшая заряженная частица, а протон — легчайший барион). Если бы сохранение странности было абсолютным законом, то K-мезон вообще не мог бы распадаться и был бы возведен в ранг стабильных частиц. Но, поскольку сохранение странности господствует лишь над сильными взаимодействиями, но не над слабыми, K-мезонам не удается испытать лишь очень быстрый распад (спустя примерно 10^{-22} *сек*), который характерен для сильных взаимодействий. Но слабые взаимодействия нарушают закон сохранения странности, поэтому, действуя по-своему, не спеша, они заставляют K-мезон распадаться спустя примерно 10^{-10} *сек*.

Закон сохранения странности оказывается как раз одним из тех новых законов сохранения (остальные обсуждаются в главе восьмой), носящих частный характер, которые применимы к сильным взаимодейст-

виям и неприменимы к слабым. Почему одни законы сохранения оказываются абсолютными, а другие — частными? Почему сильные взаимодействия ограничены бо́льшим числом законов сохранения, нежели слабые взаимодействия? Таковы вопросы, на которые никто не знает ответа. Они сохранят свое стимулирующее значение и в будущем, и очень может быть, что без ответа на эти вопросы мы не сможем глубже понять природу элементарных частиц.

Резонансы

Пятидесятые годы явились эрой странных частиц. Шестидесятые годы ознаменовались появлением нового потока частиц, живущих столь мало, что вообще не заслуживают того, чтобы их называли частицами. По ряду причин, которые было бы слишком сложно здесь обсуждать, эти сверхкороткоживущие частицы назвали «резонансами». Наши сведения о резонансах еще слишком отрывочны, однако ряд фактов уже известен. Их открыто довольно много, некоторые являются странными, некоторые — нет, часть из них принадлежит к барионам, другая — нет, но *все* они участвуют в сильных взаимодействиях. В табл. 4 приведены характеристики известных резонансов. Содержание ее и, вероятно, размеры в ближайшие годы, несомненно, претерпят значительные изменения. Даже названия частиц и те собственно только временные ярлыки, которые, по-видимому, будут пересмотрены.

Основное, чему научили нас резонансы, это то, что история 35 частиц, перечисленных в табл. 1, далека от своего завершения. Просто это частицы, которые по той или иной причине (обычно вследствие запрета, налагаемого законами сохранения) живут достаточно долго, чтобы их можно было заметить. Резонансы дополняют эту картину. Это сильно взаимодействующие частицы, которым ни один из законов сохранения не препятствует в осуществлении их естественного желания распадаться как можно быстрее. Поэтому эти частицы исчезают на протяжении короткого промежутка времени, характерного для сильных взаимодействий, уступая место более легким частицам.

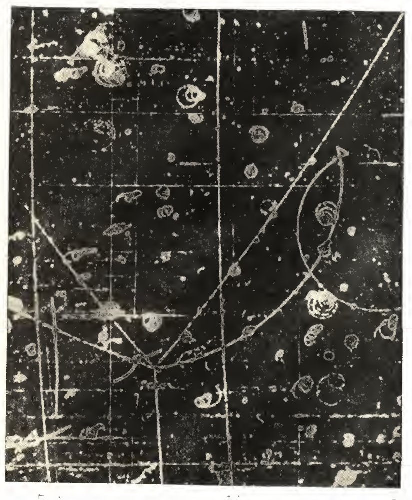
ТАБЛИЦА 4

Резонансы, или сверхкороткоживущие частицы [1])

Тип (в скобках странность)	Символ	Масса, *Мэв*	Спин и четность	Изотопический спин (в скобках число различных частиц)	Типичный способ распада
			Мезоны		
η (0)	ω φ f	782,8 1019,5 1253	1^- 1^- 2^+ (?)	0 (1)	$\omega \to 3\pi$ $\varphi \to 2K$ $f \to 2\pi$
π (0)	ρ	763	1^-	1 (3)	$\rho \to 2\pi$
K (+1)	K^*	891	1^-	$^1/_2$ (2)	$K^* \to K\pi$
			Барионы		
N (0)	$N^*_{1/2}$ (1480) $N^*_{1/2}$ (1512) $N^*_{1/2}$ (1688) $N^*_{1/2}$ (2190)	1480 1512 1688 2190	$^1/_2{}^+$ $^3/_2{}^+$ $^5/_2{}^+$ $^9/_2{}^+$	$^1/_2$ (2)	$N^*_{1/2} \to N\pi$ $\}\ N^*_{1/2} \to N\pi;\ N\pi\pi$ $N^*_{1/2} \to N\pi;\ \Lambda K$

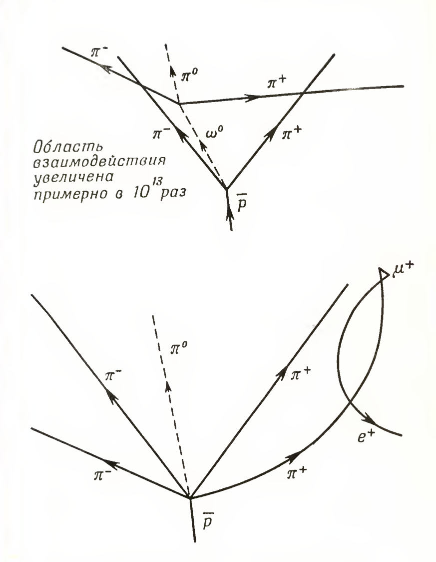
Δ (0)	$N^*_{3/2}(1238)$	1238	$3/2^+$	$3/2$ (4)	$N^*_{3/2} \to N\pi$
	$N^*_{3/2}(1920)$	1920	$7/2^+$		
	$N^*_{3/2}(2360)$	2360	$11/2^+$ (?)		
Λ (—1)	$Y^*_0(1405)$	1405	$1/2^-$ (?)	0 (1)	$Y^*_0 \to \Sigma\pi$
	$Y^*_0(1520)$	1518	$3/2^-$		$Y^*_0 \to \Sigma\pi;\ N\overline{K};\ \Lambda\pi\pi$
	$Y^*_0(1815)$	1815	$5/2^-$		
Σ (—1)	$Y^*_1(1385)$	1382	$3/2^+$	1 (3)	$Y^*_1 \to \Lambda\pi;\ \Sigma\pi$
	$Y^*_1(1660)$	1660	?		$Y^*_1 \to \overline{K}N;\ \Sigma\pi;\ \Lambda\pi;\ \Sigma\pi\pi;\ \Lambda\pi\pi$
	$Y^*_1(1765)$	1765	$5/2^-$		$Y^*_1 \to \overline{K}N;\ \Lambda\pi$
Ξ (—2)	$\Xi^*(1530)$	1529	$3/2^+$	$1/2$ (2)	$\Xi^* \to \Xi\pi$
	$\Xi^*(1810)$	1810	?		$\Xi^* \to \Xi\pi;\ \Lambda\overline{K};\ \Sigma\overline{K}$

[1]) В таблице собраны наиболее твердо установленные резонансы, испытывающие сильные распады. — *Прим. перев.*



ФИГ. 28. *Образование ω-частицы (резонанса).*

Аитипротои движется в пузырьковой камере снизу вверх, аииигилирует ω-частица распадается еще иа три π-мезоиа. Мимолетное существова тите виимаиие, что одии из положительиых π-мезоиов тоже распадается позитрои: $\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_e + \overline{\nu}_{\mu}$.



с протоиом и создает два π-мезоиа н ω-частицу. По истечении 10^{-22} *сек* ние ω-частицы устанавливается при изучении следов π-мезоиов. (Обра иа μ-мезои: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, а μ-мезон в свою очередь распадается на Нейтрино, конечно, остаются невидимыми.)

Обычно рождение и гибель резонанса происходят на расстояниях, значительно меньших, чем размеры отдельного атома. Лишь изучая долгоживущие продукты его распада, можно вообще установить сам факт его существования. Допустим, например, что при аннигиляции протона и антипротона образовались пять π-мезонов:

$$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0.$$

Этот процесс иллюстрируется фиг. 28. На фотографии, полученной с помощью пузырьковой камеры, видны следы падающего антипротона и четырех заряженных π-мезонов, вылетающих, казалось бы, в точности из одного места. Законы сохранения энергии и импульса требуют, чтобы невидимый нейтральный π-мезон также вылетал из этой точки. Изучение большого числа таких событий обнаружило, что в случае отдельных групп π-мезонов имеются определенные соотношения между частицами, которые подразумевают, что эти π-мезоны должны быть продуктами распада одной частицы. Наличие подобной корреляции между π-мезонами показывает, что в действительности происходит двухкаскадный процесс. Сначала образуется ω^0-мезон

$$\bar{p} + p \rightarrow \omega^0 + \pi^+ + \pi^-,$$

который затем распадается:

$$\omega^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0.$$

Несмотря на то что ω^0-мезон не успевает даже отойти на измеримое расстояние от точки, где он образовался, нет никаких сомнений в том, что он существует как единое целое.

Можно считать, что резонансы как бы случайно взгромоздились на верхние ступени неких лестниц. На нижней ступени каждой лестницы находится долгоживущая частица, устойчивость (или частичная устойчивость) которой обусловлена законом сохранения, или же ее равнодушием к сильным взаимодействиям, или, наконец, тем, что эта частица лишена массы и

уже «пала так низко», что «дальше некуда». На нижней ступени одной из лестниц находится π-мезон — легчайшая из сильно взаимодействующих частиц. Над π-мезоном расположены ρ- и ω-мезоны, которые могут быстро скатиться до уровня π-мезона. У подножья другой лестницы находится протон — легчайший из барионов. Более высокие ступеньки заняты короткоживущими нуклонными резонансами N и Δ. На нижней ступени еще одной лестницы расположился легчайший из странных барионов — Λ-частица. Над ним находятся странные резонансы Λ[1]).

Число обнаруженных резонансов (считая по отдельности частицы с разными зарядами и античастицы) перевалило за 100.

Основной вывод, к которому ведет знакомство с резонансами, если он еще не очевиден, состоит в том, что нет проблемы μ-, π- и K-мезонов. Существует единая проблема структуры элементарных частиц. Слишком много существует частиц и запутанных связей между ними, чтобы рассчитывать на объяснение свойств какой-либо одной или нескольких, до того как станет понятно все.

Магнитный заряд (монополь)

Мы завершим эту главу несколькими замечаниями по поводу частицы, которую никогда не видели и которой вполне может не быть, — элементарного магнитного заряда. Нет такого правила, которое утверждало бы, что монополь должен существовать. Но нет и такого закона, который запрещал бы его существование, и это подогревает интерес физиков к этой частице и заставляет их на протяжении последних 30 лет время от времени пускаться на ее поиски.

Электрические и магнитные явления обнаруживают заметную асимметрию. Электрические заряды, порождающие электрические поля и электрические силы,

[1]) Более подробно с современной классификацией элементарных частиц читатель может познакомиться по очеркам А. С. Компанейца «О симметрии» и «Симметрия в микромире», изд. «Знание», 1965. — *Прим. перев.*

встречаются определенными порциями в форме элементарных частиц. Согласно электромагнитной теории, в природе могли бы также существовать в такой же степени элементарные источники магнитных явлений, элементарные магнитные заряды. Конечно, если бы наряду с электрическими существовали бы и магнитные заряды, то теория приобрела бы более симметричный и элегантный вид. Но человек не может предписывать природе законы. Электрические заряды были обнаружены в избытке, магнитных никто никогда не находил.

До сих пор было известно, что все магнитные явления возникают в результате *движения* электрических зарядов. Одних электрических зарядов оказывается достаточно для создания как электричества, так и магнетизма, однако они делают это несколько несимметрично. Для возникновения магнетизма электрические заряды должны прийти в движение (ток в проводнике или вращающийся электрон), а сами по себе заряды даже в состоянии покоя порождают электрические явления. С другой стороны, покоящийся монополь порождал бы магнитные явления, а движущийся монополь — электричество. Таким образом, монополи создали бы большую симметрию в электрических и магнитных явлениях (магнитные полюса магнитного стержня или земного шара не имеют ничего общего с элементарной частицей — монополем, о которой идет речь).

В 1962 г. был предпринят ряд попыток обнаружить монополь. В Женеве и Брукхэйвене физики занялись поисками монополей, рассчитывая на их возникновение при соударении протонов с очень высокой энергией с ядрами, происходящими на ускорителях на 30 *Гэв*. Поиски иного характера проводились группой физиков Массачусетского технологического института. Эти физики поместили в области залегания железной руды в горах Адирондак чрезвычайно мощный электромагнит в надежде извлечь из руды монополи. Если бы за последнее тысячелетие в космических лучах существовали монополи или возникали при бомбардировке этими лучами атмосферы, то они должны были бы захватиться природными залежами железа на

Земле. Но результаты всех трех опытов показали: монополей нет.

В прошлом слишком часто оказывалось, что в микромире природа делает все, что не абсолютно запрещено законами сохранения, чтобы легко отказаться от этого. Большинство физиков, говоря о невидимых монополях, допускают лишь две возможности. Либо существует пока неоткрытый закон сохранения, который объясняет, почему монополи не существуют, либо они в действительности *существуют*, но до сих пор избегали регистрации.

ГЛАВА
СЕДЬМАЯ

Поля и частицы, силы и взаимодействия

В этой главе речь пойдет о двух самых основных представлениях современной науки. Первое из них связано с идеей квантового поля, простейшего материала мироздания, из которого строятся частицы и весь материальный мир. Второе — идея элементарного акта, мгновенного события, сконцентрированного в отдельной точке пространства и времени. Первое представление характеризует бытие, второе — действие. Из эфемерных полей возникают твердые тела, представляющие собой прочные элементы окружающего нас мира, а процессы рождения и гибели частиц, носящие характер катастроф, порождают размеренное и упорядоченное течение жизни в макроскопическом мире.

Мы затрагивали оба эти представления в главе третьей. Теперь нам хотелось бы выяснить, каким образом обе эти идеи вместе с данными, накопленными при изучении элементарных частиц, позволяют ученым нарисовать картину субмикроскопического мира. Как возникла эта необычайно беспорядочная, поистине немыслимая картина микромира и как

можно совместить ее с совершенно иными представлениями о мире, которые складываются у нас благодаря нашим непосредственным ощущениям?

Основы представления о поле были заложены свыше ста лет назад в трудах английских физиков Фарадея и Максвелла. Представлению о поле было суждено проникнуть в здание науки, по существу, с черного хода, так как для Фарадея и Максвелла поле вовсе не было самостоятельной субстанцией, а было лишь обозначением возмущенного состояния другой субстанции — эфира. Говоря о морской или звуковой волне, мы подразумеваем, что термин «волна» обозначает особого рода возмущенное состояние воды или воздуха, а не что-то существующее в действительности само по себе. Аналогичным образом, говоря об электрическом поле, Фарадей и Максвелл имели в виду возмущение, т. е. состояние деформации или неоднородности исходной субстанции, всепроникающего эфира, который, как предполагалось, заполняет все пространство. Поле явилось более общим представлением, чем волна. Поле не обязательно должно испытывать колебания или распространяться. Неподвижные электрические заряды могут порождать в непосредственной близости от себя стационарное возмущение, называемое электростатическим полем. Если заряды колеблются, то они порождают осциллирующее электромагнитное поле, которое распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн. Именно изучение этих волн привело Максвелла к объяснению природы света.

Согласно представлениям о поле, развитым Фарадеем и Максвеллом, электрический заряд, находящийся в заполненном эфиром пространстве, подобен рыбе, плавающей в глубинах безбрежного океана. Вода не влияет на рыбу, хотя и окружает ее со всех сторон (или не влияла бы, если бы не было внутреннего трения). Если в непосредственной близости от первого заряда оказывается второй, то в эфире возникают «натяжения»; частица ощущает «поле», возникающее в непосредственной близости от нее, и испытывает притяжение или отталкивание, подобно тому как рыба восприняла бы взрыв глубоководной бомбы неподалеку от нее. Рыбе показалось бы, что ее ударило что-

то вполне реальное (она могла бы назвать это полем), хотя это была всего-навсего только вода.

Однако в идее Фарадея — Максвелла было нечто большее, нежели простое название. И хотя в воображении людей первоосновой был эфир, а поле носило лишь вспомогательный характер, на самом деле понятию поля можно было дать строгое математическое определение и использовать его в уравнениях электромагнитной теории, ибо измерению поддавался не сам эфир, а лишь поле, т. е. возникшие в эфире неоднородности.

Когда Эйнштейн вообще изгнал эфир как ненаблюдаемый и поэтому лишенный смысла, это не вызвало беспорядка в теории электромагнитного поля. Появление поля произвело революцию в умах, но уравнения теории остались абсолютно неизменными. Однако переворот во взглядах имел решающее значение с точки зрения создания благоприятных условий для дальнейшего развития теории поля. Благодаря Эйнштейну поле превратилось в физическую реальность, которая существует в действительно пустом (в остальных отношениях) пространстве.

Используя грубую аналогию, мы можем сказать, что представление о поле как о возмущении в жидкости уступило место представлению о поле как о самой жидкости, но не вездесущей, а скорее рассеянной повсюду, где-то более щедро, а где-то более скупо, и часто распространяющейся в пространстве в виде сгустка волн (волнового пакета). Пространство стало больше походить не на глубины спокойного океана, а на дно высохшего ручья; что же касается электромагнитной волны, то ее теперь можно сравнить с внезапным весенним потоком, сбегающим по дну ручья, а не на волны сжатия, распространяющиеся в море. Электрический заряд, поглотивший электромагнитное излучение, стал казаться уже не рыбой, подвергающейся удару импульсом давления, а беспечным грызуном, внезапно застигнутым на дне русла обрушившейся на него стеной воды.

Признание за полем права считаться физической реальностью было первым из двух больших переворотов, произошедших в представлениях физиков о поле. Вторым переворотом явилась замена «классиче-

ских» представлений о поле как о жидкой субстанции, распределенной по некоторой области пространства, «квантовыми» представлениями, в которых поле приобрело корпускулярный оттенок, и могло по частям порождаться и уничтожаться.

Как это ни поразительно, но в оба эти переворота в представлениях о поле существенный вклад внес Альберт Эйнштейн. Первый шаг — изгнание эфира и утверждение поля как физической реальности — был связан с разработкой Эйнштейном теории относительности. Второй — построение квантовой или корпускулярной картины поля — получил прочное обоснование в виде фотонной гипотезы Эйнштейна, которая дала объяснение специфическим особенностям фотоэлектрического эффекта. Эйнштейн установил, что электроны должны поглощать электромагнитное излучение не постепенно и непрерывно, а мгновенно порциями и что испускание излучения происходит таким же образом. Представление о фотонах потребовало, чтобы рождение поля напоминало стрельбу из пулемета, а не вытекание воды из шланга. Эти корпускулярные свойства обнаруживаются только в моменты испускания или поглощения. В остальное время поле больше похоже на поток воды, чем на пули, т. е. на жидкую субстанцию, которая не концентрируется в каких-то точках, а разлита по некоторой области пространства и распространяется от точки к точке в виде волны. Более того, и это имеет решающее значение для кажущейся непрерывности окружающего нас мира и постепенного характера происходящих в нем явлений, даже процессы испускания и поглощения приобретают волновые черты, если в них одновременно участвует достаточное количество пуль. Мы уже вполне свыклись с мыслью, что кажущаяся плавность и непрерывность обычного вещества обманчивы и возникают лишь вследствие мельчайших размеров атома и несметного количества их в любом предмете, видимом глазом или даже в микроскоп. К этим неделимым единицам *вещества* теперь надо добавить неделимые единицы *действия*. Подобно тому как кажущееся сплошным вещество в действительности дискретно в субмикроскопических масштабах, так и внешне непрерывный поток событий на самом деле имеет ха-

рактер последовательности отдельных крошечных взрывов. Та плавность и непрерывность событий и вещей, которую мы наблюдаем вокруг себя, почти без исключения возникает в результате наложения бесчисленной последовательности элементарных событий.

Двойственный характер поля, заключающего в себе как волновые, так и корпускулярные свойства, не поддается наглядной интерпретации, поскольку он ни на что не похож в окружающем нас макромире. Несмотря на ограниченность нашего воображения, успешное развитие квантовой теории вынудило нас принять эти особенности волновых полей, которые могут возникать и исчезать с внезапностью взрыва. Чтобы получить грубое представление о характере поглощения фотона, вообразим себе, что фильм о гейзере «Старый праведник» пустили в обратном направлении. Сначала мы увидим висящий в воздухе водяной веер (т. е. «поле»), который внезапно начнет стягиваться в «небольшое отверстие» в почве («поглощающий электрон») и исчезнет в нем. В случае квантового поля подобное стягивание волны происходит не просто быстро, а мгновенно.

Представление о квантовом поле и корпускулярно волновом дуализме зародилось в 1905 г. и было связано с электромагнитным полем и фотоном. Но наши современные и более общие представления о полях как исходной субстанции Вселенной возникли лишь в конце 20-х — начале 30-х годов. Еще в 1926 г., когда была создана новая квантовая теория, частицы и поля считались совершенно различными вещами. Последний барьер между представлениями о полях и частицах был разрушен физиками довольно неожиданно при попытке объединить теорию относительности и квантовую механику. Тут же выяснилось, и причины этого нельзя было заранее предвидеть, что такой синтез возможен только в том случае, если *все* частицы, как имеющие, так и не имеющие массы (и электроны и фотоны), считать квантами или сгустками поля, лежащего в их основе. Так внезапно возникла необходимость добавить к электромагнитному полю электронное и протонное поля, и чем больше частиц становилось известно, тем больше должно было быть различных полей. Существенная особенность этой по-

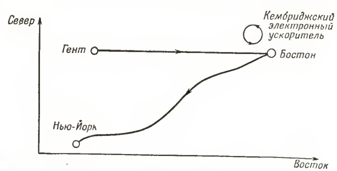
левой теории элементарных частиц состояла в том, что не только фотонам, но и всем остальным частицам присуща способность рождаться и гибнуть. Теперь, конечно, возникла другая трудность, обусловленная слишком большим разнообразием полей, в которое никто в действительности не верил. Скорее всего каждая из известных частиц не может быть квантовым проявлением различных полей; хотя мы пока и не понимаем, как это происходит, но все частицы должны возникать из одного или очень небольшого числа фундаментальных полей (такой взгляд в настоящее время не имеет под собой почвы и основан целиком на интуиции).

Подведем итог современным представлениям о полях и частицах: существует эфемерная физическая субстанция, называемая полем, которая может распространяться в пространстве в виде волны и переносить энергию, импульс и массу (а также электрический заряд и другие измеримые величины). Всякий раз, когда поле возникает или исчезает, это происходит катастрофически внезапно в определенной точке пространства и времени. Специфической особенностью каждого поля является наличие связанной с ним определенной массы. Сгусток электронного поля может родиться с любой кинетической энергией или любым импульсом, но всегда с одной и той же неизменной массой, которая в точности совпадает с массой частицы, называемой электроном. Сегодня в теории поля существуют две загадки: кажущееся многообразие различных полей и природа присущей полю массы. По никому не ясным причинам в некоторых полях в форме массы скрыто большое количество энергии, в других — очень немного, а в третьих — совсем ничего.

В оставшейся части этой главы мы будем иметь дело с рождением и гибелью полей, т. е. с корпускулярными аспектами полей. Взаимодействие одного поля с другим — источник всех событий в мире — несет в себе корпускулярные свойства полей и поэтому легко поддается наглядному толкованию. Можно считать, что частица рождается в определенной точке, улетает в другое место и там гибнет. Но мысленно мы должны представлять себе более сложную картину, в

которой рождаются сгустки поля, распространяющиеся в виде волны, а затем внезапно снова поглощающиеся.

Прежде всего нам придется познакомиться с четырехмерной географией. Описывая взаимодействие частиц, важно представлять себе не только где, но и когда, т. е. иметь в виду траекторию как во времени, так и в пространстве. Это не так трудно, как может показаться. Вообразим сначала обычную карту, на которой вертикальная линия указывает север — юг, а горизонтальная — восток — запад. На такую карту

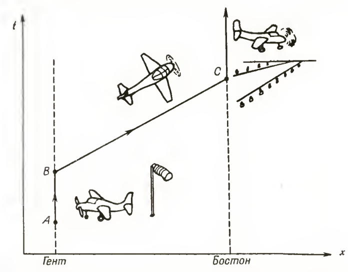


ФИГ. 29. *Маршруты на пространственной карте.*

можно нанести пространственную траекторию. На фиг. 29 изображен извилистый путь автомашины, прошедшей из Бостона в Нью-Йорк, прямолинейный путь самолета, пролетевшего из Гента в Бостон, и (в увеличенной шкале) круговая траектория электронов в Кембриджском электронном ускорителе. На такой карте прекрасно передан маршрут, но по ней нельзя установить, когда автомашина, самолет или электрон были в каком-то определенном месте. Для этого время на маршруте можно обозначить стрелкой, которая по крайней мере укажет, какая часть пути пройдена раньше, а какая — позже.

Если бы мы хотели очень точно знать маршрут, а не просто получить «вид сверху», то потребовалось бы перейти к трехмерной карте, на которой была бы

нанесена высота самолета, а также его положение над поверхностью земли. А это уже несколько сложнее. Если пойти еще дальше и нанести на карту не только положение самолета, но и историю его полета во времени, то для этого потребуется четырехмерная карта, которую мы не только не можем изобразить, но которую даже невозможно себе представить. К счастью,



ФИГ. 30. *Маршруты на пространственно-временно́й карте.*

пространственно-временна́я карта (как и двумерная пространственная карта, которая весьма полезна, хотя и не вполне точна) может вполне заменить четырехмерную карту.

Допустим, что мы хотели бы изобразить историю полета самолета в пространстве и времени. Поскольку самолет летел на восток, мы можем обойтись без вертикальной линии север — юг и заменить ее линией времени. Новая пространственно-временна́я карта будет выглядеть подобно фиг. 30. Горизонтальная ось x представляет собой расстояние, а вертикальная ось t — время. Первое, что следует отметить, это отсутствие на пространственно-временно́й карте мест, соответствующих полному покою. То, что остается на

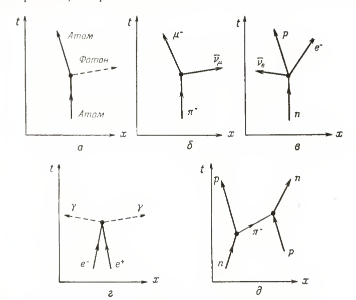
месте, например город Гент, не избегает течения времени. Подобные предметы изображаются на нашей карте вертикальной прямой; их положение x всегда остается одним и тем же, но с течением времени они перемещаются на карте вертикально вверх, оставляя след, который называют «мировой линией». Мировая линия Гента изображена на фигуре вертикальной пунктирной линией, а другая такая же линия к востоку представляет собой мировую линию Бостона. Ну а как же самолет? Пока он находится на аэродроме в Генте, он тоже перемещается только во времени, но не в пространстве и изображается вертикальной линией (отрезок AB). Затем самолет взлетел и взял курс на восток, перемещаясь как в пространстве, так и во времени; теперь он изображается мировой линией BC. После приземления в Бостоне он опять перемещается лишь во времени и его мировая линия направлена вверх.

Мы снабдили мировую линию самолета стрелками. Они могут показаться излишними, так как существует лишь одно возможное направление движения во времени — вперед. Однако они не помешают и окажутся полезными при рассмотрении мира элементарных частиц.

Упрощенные пространственно-временные карты позволяют описать движение лишь вдоль прямой, однако этого достаточно для понимания взаимодействий элементарных частиц. Мы всегда можем представлять себе более сложную карту, скажем с двумя пространственными и одним временным измерениями, но лучше ограничиться диаграммами приведенного выше вида.

Обратимся теперь к миру элементарных частиц. На фиг. 31 изображены мировые линии нескольких простых процессов. На фиг. 31, *а*, например, изображен процесс испускания фотона атомом. Первоначально атом покоился (началом отсчета служит низ), и, подобно городу Бостону, он изображается вертикальной мировой линией. Затем атом испускает фотон, который улетает вправо, а сам атом после этого движется более медленно влево. Заметьте, что чем медленнее движется частица, тем ближе к вертикальной ее мировая линия; при отсутствии перемещения линия идет в точности вертикально. И наоборот, чем быстрее движется частица, тем мировая линия ближе

к горизонтальной. Однако мировая линия никогда не будет точно горизонтальна, ибо в этом случае частица перемещалась бы от точки к точке, не затрачивая на это времени. Наклон фотонной линии оказывается минимальным, так как фотон движется с предельной скоростью, скоростью света.



ФИГ. 31. *Мировые линии различных процессов в мире элементарных частиц.*

а — испускание фотона атомом; *б* — распад π-мезона; *в* — β-распад нейтрона; *г* — анингиляция позитрона и электрона; *д* — процесс обмена π-мезоном.

Фиг. 31, *б* иллюстрирует распад π-мезона

$$\pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu}.$$

В точке, обозначенной черным кружком, отрицательный π-мезон перестает существовать. Он погибает, и его мировая линия обрывается. Но в том же месте и в тот же момент (т. е. в той же точке пространства-времени) рождаются отрицательный μ-мезон и антинейтрино; они разлетаются в разные стороны, и наклон

мировой линии антинейтрино соответствует скорости света.

Черный кружок обозначает то, что в теории относительности называют просто «событием» в отдельной точке пространства и времени. На каждой из остальных диаграмм фиг. 31 изображено по крайней мере одно важное событие. В мире элементарных частиц такое событие обозначает рождение и (или) гибель частиц.

На фиг. 31,*в* показан β-распад нейтрона

$$n \to p + e^- + \overline{\nu}_e.$$

В данном случае основное событие, происходящее в пространстве-времени, состоит в разрушении одной частицы и рождении трех других. На следующей диаграмме (фиг. 31,*г*) изображена гибель электрона и позитрона с образованием двух фотонов (γ-квантов)

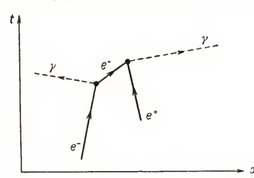
$$e^- + e^+ \to \gamma + \gamma.$$

Наконец, фиг. 31,*д* иллюстрирует процесс обмена π-мезоном, который обусловливает силу, действующую между нейтроном и протоном. Первоначально (внизу диаграммы) существуют нейтрон и протон. Они обмениваются π-мезоном и разлетаются с разными скоростями. Согласно теории Юкавы, сила, действующая между двумя нуклонами, обусловлена целиком этим обменом, а также различными, более сложными процессами обмена, которые также могут иметь место.

Прежде чем перейти к вопросу о том, в каком отношении эти графики находятся с тем, что́ происходит в действительности в микромире, следует сделать некоторые предупреждения. Очень может быть, что некоторые из элементарных «событий», обозначаемые черными кружками, в действительности представляют собой сложную последовательность событий, происходящих в столь крошечной области пространства и за столь короткий промежуток времени, что они только кажутся событиями, сосредоточенными в отдельной точке пространства-времени. Например, известно, что аннигиляция электрона и позитрона происходит совсем не так, как изображено на фиг 31, *г*. В действи-

тельности оба фотона испускаются из различных точек, как показано на фиг. 32.

Мы должны быть готовы к тому, что в будущем внутренняя структура сведется к иному набору внешне простых событий. Возможно, что кажущиеся внезапными акты аннигиляции и рождения, носящие характер катастроф, в действительности окажутся результатом непрерывного и плавного потока событий



ФИГ. 32. *Что́ «в действительности» происходит при аннигиляции позитрона и электрона (уточненный вариант фиг. 31, г).*

в еще более крошечных областях пространства и времени, нежели удавалось исследовать до сих пор. Это, конечно, чистая фантазия. Вплоть до самых малых расстояний (10^{-14} *см*) и самых коротких промежутков времени (10^{-24} *сек*), на которые проник человек, процессы в мире элементарных частиц пока остаются внезапными актами рождения и гибели, носящими характер катастроф и происходящими со сгустками энергии поля, которые мы называем частицами.

Накопление экспериментальных данных о свойствах микромира наряду с подтверждением квантовой теории поля привели к следующим очень важным выводам общего характера. Все взаимодействия в природе обусловлены актами рождения и гибели частиц, происходящими в определенных точках пространства и времени. В этом утверждении содержатся две основные идеи. Во-первых, все взаимодействия состоят из процессов рождения и гибели частиц; во-вторых, эти

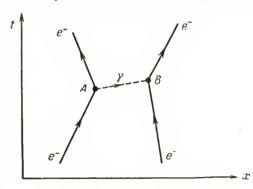
процессы рождения и гибели происходят мгновенно и локализованы в точке, а не распределены по пространству и не длятся во времени. «Взаимодействие» означает просто влияние чего-либо на что-то иное. Таким образом, все обычные силы, т. е. воздействие одного тела на другое, представляют собой взаимодействия. Распад нестабильной частицы также служит проявлением взаимодействия. Конечные частицы находятся под «влиянием» начальных частиц, они вызываются к жизни только благодаря присутствию начальных частиц.

Сопоставим эти новые представления о взаимодействиях с классической точкой зрения. Солнце «взаимодействует» с Землей, поскольку Земля притягивается Солнцем. При этом, казалось бы, ничего не рождается и не гибнет и не происходит никаких мгновенных событий в отдельных точках пространства и времени. Но, согласно новой точке зрения, гравитоны постоянно испускаются и поглощаются как Солнцем, так и Землей. Каждый акт испускания и поглощения происходит в определенный момент времени и в определенной точке пространства. Испытываемая Землей «сила» есть не что иное, как суммарный эффект всех таких гравитационных взаимодействий.

Обратимся к примеру, заимствованному из мира элементарных частиц и достаточно хорошо изученному. Для этого рассмотрим «рассеяние» двух электронов. Согласно старой точке зрения, электроны, приближаясь друг к другу, испытывают взаимное отталкивание, замедляются и отклоняются в разные стороны. Новые представления рисуют иную, более законченную картину: они объясняют, «почему» электроны воздействуют друг на друга. На фиг. 33 изображены два приближающихся друг к друг электрона. В точке A левый электрон испускает фотон и изменяет *свою* скорость. В точке B правый электрон поглощает фотон и меняет *свою* скорость. Оба электрона взаимодействуют друг с другом или оказывают воздействие друг на друга, поскольку изменяется их движение. Это предполагаемое взаимодействие осуществляется в результате обмена фотонами. Строго говоря, исходным оказывается взаимодействие вовсе не между двумя электронами, а между каждым из электронов и фото-

ном. Второй электрон лишь косвенно осведомлен о присутствии первого. Старое представление о действии на расстоянии, т. е. о силе, которая «протягивается» от одного тела до другого, теряет всякий смысл. На смену приходит идея «локального» (точечного) взаимодействия, которое означает, что каждый электрон взаимодействует с фотоном локально, т. е. в той точке, где он находится.

Рассмотренный здесь пример диаграммы, конечно, лишь один из многих; другие примеры содержат более сложные процессы обмена между электронами.



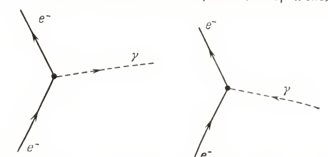
ФИГ. 33. *Мировые линии, описывающие взаимодействие и отклонения двух электронов.*

В результате всех возможных процессов обмена происходит отклонение электронов в соответствии с действием обычной силы электрического отталкивания. При этом движение представляет собой не плавные переходы, а скорее последовательность отдельных скачков.

Согласно современной теории взаимодействия электронов и фотонов, диаграмма, изображенная на фиг. 33, иллюстрирует то, что́ «в действительности» происходит в микромире. Подобные диаграммы называют фейнмановскими, в честь Ричарда Фейнмана, который показал в 1949 г., что такие картины в точности соответствуют математическим выражениям полевой теории электронов и фотонов. Таким образом, эти диаграммы описывают то, что происходит «в действи-

тельности», и служат удобным способом изображения различных процессов рождения, гибели и обмена.

Изюминкой фейнмановской диаграммы является «вершина», т. е. точка, в которой (в нашем примере) происходит рождение или поглощение фотона. *Все* процессы с участием фотонов и, таким образом, *все* электромагнитные взаимодействия возникают из элементарных актов испускания или поглощения фотонов. Эти фундаментальные процессы можно представить с помощью единственной вершины, которая сходна



ФИГ. 34. *Вершины, описывающие фундаментальные взаимодействия электрона с фотоном.*

с любой из диаграмм на фиг. 34. Сплошные линии изображают заряженные частицы, пунктирные — фотоны. Точки *A* и *B* на фиг. 33 являются вершинами такого типа.

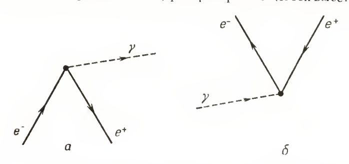
Если сплошные линии представляют собой мировые линии, например, электронов, то фундаментальные процессы можно рассматривать как акты испускания или поглощения фотона, сопровождающиеся одновременным изменением состояния движения электрона. Однако существует более общее и более плодотворное толкование. Можно считать, что вершина представляет собой точку, в которой заканчивается мировая линия одного электрона и начинается мировая линия другого. Согласно этому толкованию, вершина характеризует событие, носящее характер истинной катастрофы. Ничто не переживет ее. Вместо того чтобы считать, что в вершине происходит изменение состояния отдельного электрона, можно думать, что один

электрон исчезает, а другой электрон рождается. Поскольку все электроны неразличимы, то бессмысленно говорить о том, что вылетающий электрон совпадает с падающим или отличается от него. Однако если мы будем считать вылетающий электрон новой частицей, то это будет ближе соответствовать математическому аппарату теории фундаментальных взаимодействий. Интерпретация вершины как точки уничтожения и рождения ведет также к простому, единому описанию событий, происходящих с частицами и античастицами.

Правая вершина на фиг. 32 как будто отличается от вершин, показанных на фиг. 33 и 34. Вместо точки, в которой кончается мировая линия одного электрона и начинается мировая линия другого, эта вершина представляет собой точку, в которой кончаются мировые линии и электрона, и позитрона. Существует простой прием, с помощью которого мы можем радикально изменить эту картину. Допустим, что мы изменили направление стрелки на мировой линии позитрона. После всего, что уже говорилось, стрелки могут показаться лишними, так как все частицы движутся в том же направлении, что и течение времени. Мы можем использовать их для того, чтобы отличать частицы от античастиц. Стрелка, указывающая в «нужном» направлении, будет обозначать частицу (например, электрон), а стрелка, смотрящая в «противоположном» направлении, будет обозначать античастицу (позитрон). Используя эти модернизированные обозначения, мы изобразили на фиг. 35, *а* вершину, которая описывает аннигиляцию электрона с позитроном, а на фиг. 35, *б* — вершину, которая описывает рождение электрона и позитрона. Эти диаграммы с позитронами имеют вид перевернутых диаграмм, приведенных на фиг. 34. Общий вывод таков: фундаментальная электрон-фотонная вершина при вращении относительно нее в пространстве-времени будет описывать все мыслимые основные взаимодействия между электронами, позитронами и фотонами. Такой подход дает нам возможность получить простое и общее представление о том, что́ лежит в основе всех электромагнитных явлений.

Обсуждая связь подобных диаграмм со структурой математического аппарата теории взаимодействия

электронов, позитронов и фотонов, Фейнман показал, что обращение стрелки обозначает нечто большее, нежели хитроумный прием. Согласно теории поля, рождение позитрона «эквивалентно» гибели электрона (эти процессы не тождественны, но теория утверждает, что коль скоро возможен один, то будет происходить и другой). Более того, математическое описание позитронного поля, распространяющегося вместе

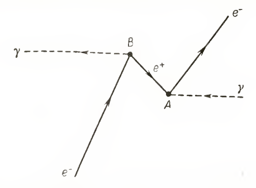


ФИГ. 35. *Дополнительные вершины, описывающие фундаментальные взаимодействия электрона с фотоном и включающие античастицы (позитроны).*

с течением времени, тождественно описанию электронного поля, распространяющегося в направлении, противоположном течению времени. Нет ничего непоследовательного в представлении о том, что частицы движутся не только в том же направлении, что и течение времени, но и в противоположном направлении.

Это обстоятельство не обязательно должно привести нас к глубоким философским выводам, хотя их и трудно избежать. Позитрон *можно* описывать как электрон, движущийся в направлении, противоположном течению времени, однако делать это совсем *не обязательно*. В равной степени возможно и иное описание, при котором позитрон будет выглядеть нормальной частицей, движущейся вместе с течением времени. Тем не менее представление о движении в направлении, противоположном ходу времени, упрощает картину элементарных взаимодействий и дает «естественное объяснение» существованию антивещества. Рассмотрим диаграмму Фейнмана, изображен-

ную, например, на фиг. 36. Согласно обычному представлению, время течет в одном направлении, и мы движемся по диаграмме снизу вверх. Сначала электрон и фотон сближаются. В вершине A фотон рождает пару электрон — позитрон. Родившийся электрон улетает прочь, а позитрон сталкивается в вершине B с первым электроном. Там происходит взаимная аннигиляция, в результате которой появляется



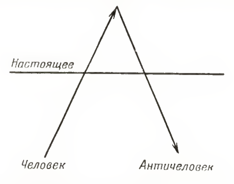
ФИГ. 36. *Фейнмановская диаграмма для процесса рассеяния фотона электроном.*

новый фотон [1]). Фейнман показал, что допустим иной подход, который состоит в следующем: первый электрон достигает точки B, где он испускает фотон, и обращает свое движение во времени. «После этого» он перемещается в точку A, где поглощает падающий фотон, и снова обращает свое движение во времени, начиная двигаться в «правильном» направлении. Каждый из этих подходов допустим и логически последователен.

Обращаясь к философским следствиям этого необычного представления о движении в обоих направлениях относительно хода времени, мы вынуждены спросить: а как же человек? Почему же мы движемся во времени только к будущему и лишены той свободы, которую имеют элементарные частицы? Ответ состоит

[1]) Это — процесс рассеяния фотона электроном, известный как комптон-эффект. Отклонение фотонов в результате столкновения с электронами было открыто в 1923 г. Артуром Комптоном.

в том, что мы обладаем той же свободой, но по счастливому случаю лишены возможности искушать ее. Человек построен из частиц, а не из античастиц; частицы всегда движутся вперед вместе со временем. Случайно (?) наш уголок Вселенной построен почти исключительно из частиц и почти не содержит античастиц. (Существует ли такая часть Вселенной, где преобладают античастицы, неизвестно.) Нам не удается найти антивещество, с которым мы могли бы аннигилировать и начать двигаться в направлении, противоположном ходу времени. Конечно, случайно в



ФИГ. 37. *«Фейнмановская диаграмма» для человека, обратившего свое движение во времени.*

каждого из нас попадают отдельные позитроны, разрушающие какие-то наши электроны, однако мы легко можем обойтись без нескольких электронов.

Такой ответ может показаться неудовлетворительным, поскольку вопрос мог быть сформулирован несколько иначе. Можно спросить: должно ли антивещество существовать заранее? Не мог ли бы человек, подобно электрону, испустить облако фотонов и обратить свой бег во времени? Ответ состоит в том, что, если бы человек намеревался сделать это в будущем, он уже знал бы об этом. Мы осведомлены о том, что происходит вокруг нас *сейчас*, и мировая линия, которая позднее обратится во времени, должна будет снова пройти через *настоящее*. На фейнмановской диаграмме (фиг. 37) настоящий момент («настоящее»)

изображен горизонтальной прямой. Если бы мировая линия человека оказалась обращенной, то человек и античеловек «из будущего» в этот момент времени существовали бы бок о бок. Это рассуждение, хотя оно и похоже на научную фантастику, совершенно логично и в действительности не отличается от рассуждения предыдущего раздела. Поскольку вокруг нас не встречается сколько-нибудь значительных количеств антивещества, мы можем быть уверены, что в будущем нам не грозит ни аннигиляция, ни обращение во времени.

Согласно теории относительности, направление течения времени совершенно не выделено. В действительности достаточно знать, что частицы в равной степени могут двигаться в ту и иную сторону во времени, влево и вправо, вверх и вниз в пространстве. Подобное представление об устройстве мира восстанавливает симметрию пространства и времени и относит *кажущуюся* односторонность течения времени за счет того, что нам приходится жить в мире, где имеется огромное несоответствие между числом частиц и числом античастиц.

К сожалению, никто не знает, каким образом проверить на опыте представление об обращенных во времени траекториях. Оно должно быть принято (если это вообще следует делать) вследствие той симметрии, которую оно вносит в нашу картину строения мира, и вследствие той простоты, которую оно вносит в описание античастиц. Для демонстрации того, что направление движения во времени нельзя определить, вообразим себя наблюдателем микроскопических масштабов событий, происходящих на фиг. 36. Если на диаграмме поместить горизонтальную линейку, а затем заставить ее медленно перемещаться вверх по диаграмме, то пересечение мировой линии с краем движущейся линейки грубо очертит последовательность наших наблюдений. (Линейка фактически должна быть слегка наклонена, чтобы учесть время, необходимое для прихода сигнала из других мест, однако эта деталь несущественна для нашего обсуждения.) Дело в том, что во времени движется не сама мировая линия, а край линейки, т. е. наши наблюдения. Мировые линии частиц можно считать

абсолютно неподвижными, просто «нарисованными» в пространстве-времени, подобно линиям на карте. Для живого существа, способного осмыслить то, что происходит на протяжении некоторого времени, подобно тому как мы постигаем пространство, изображенные на этой диаграмме процессы аннигиляции и рождения вообще лишены динамики. Это просто мертвый график, начерченный в пространстве и времени. На самом деле человек (наблюдатель) в состоянии постигать каждый раз лишь отдельные моменты времени, и это приводит к тому, что мертвые графики обретают жизнь и движение. В некий момент человек видит электрон в одном месте. Спустя некоторое время он видит электрон в другом месте. Наблюдатель, естественно, считает, что электрон, подобно человеку, перемещался во времени и перешел с одного места на другое. Однако верить этому нет особых оснований. Нам известно лишь, что мировая линия электрона очерчивает определенную траекторию в пространстве-времени, но у нас нет возможности установить как порядок, в котором наносились точки на траекторию, так и то, имеет ли смысл даже говорить о том, как и в каком направлении наносилась мировая линия.

Эти рассуждения ведут к философским вопросам, которые выходят за рамки нашей книги. Согласно теории относительности, одинаково приемлемо движение в обоих направлениях во времени, и лучше всего представлять себе мировые линии в виде статических контуров в четырехмерной географии. Из квантовой теории поля следует, что античастицы проще всего описывать как частицы, движущиеся в направлении, противоположном течению времени (это представление гармонирует также со статической картиной). Мы снова оказываемся перед фактом, что человек, безусловно, движется во времени лишь в одном направлении. Мы помним прошедшее, но не знаем будущего. Именно человеческая память и *ничто иное* открывает нам, в каком направлении мы движемся во времени. Присущее человеку ощущение асимметрии течения времени незнакомо элементарным частицам. Можно ли примирить эту асимметрию человека во времени с симметрией времени у элементарных частиц при условии, что человек представляет собой не что иное,

как собрание этих частиц? Может ли человек создавать будущее, если мировые линии в действительности представляют собой постоянные свойства четырехмерной географии? По мнению автора, на оба эти вопроса (которые, по существу, представляют собой современный вариант значительно более старых вопросов о детерминизме и свободе воли) следует ответить *положительно*. Решение кажущихся парадоксов заключается в слишком большой сложности и чрезвычайно высокой степени организации человеческого мозга. В данном случае сложность и организация слишком далеко выходят за те рамки, где имеют силу предсказания, базирующиеся на фундаментальных законах микромира, чтобы основывать на них объяснение человеческой индивидуальности.

Симметрия мира элементарных частиц относительно обращения времени нашла современное выражение в «теореме *CPT*»; три буквы в названии теоремы обозначают три операции: *C* — зарядовое сопряжение, т. е. замену частиц античастицами; *P* — инверсию пространства, которая приблизительно эквивалентна зеркальному отражению пространства (иногда ее называют операцией четности); *T* — обращение времени. Теорема *CPT* в действительности представляет собой специальный закон сохранения и, очень может быть, абсолютный закон сохранения, управляющий всеми взаимодействиями в природе. Он утверждает, что если к любому физическому процессу применить три операции *C*, *P* и *T*, то в результате подобной чехарды с тем, что́ происходит в действительности, мы получим другой физический процесс, который также мог бы происходить. Все это не так уж сложно, как может показаться; читатель легко применит это преобразование *CPT* к любой из фейнмановских диаграмм, приведенных нами. Для этого потребуется лишь плоское зеркало и немного воображения.

Сначала найдем «надлежащую» диаграмму, т. е. содержащую античастицу, на линии которой стрелка направлена вниз. Для этого подойдут фиг. 35 или последующие. Совершим теперь зарядовое сопряжение (*C*), представив себе просто, что все стрелки по-

вернулись в обратном направлении. Тем самым мы заменим частицы античастицами. (Обращение стрелки фотона не создает каких-либо трудностей, ибо фотон совпадает со своей античастицей; этим свойством обладают также нейтральный π- и η-мезоны.) Например, зарядовое сопряжение C превращает распад отрицательного π-мезона

$$\pi^- \to \mu^- + \overline{\nu_\mu}$$

в распад положительного π-мезона

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu,$$

так как положительный π-мезон является античастицей отрицательного.

Чтобы произвести пространственную инверсию (P), отвернитесь от книги и посмотрите на отражение диаграммы в зеркале. Вы увидите, что правое и левое поменялись местами. (Более общий случай пространственной инверсии с учетом спина частиц будет рассмотрен в главе восьмой.)

В заключение перевернем книгу вверх ногами и посмотрим теперь на диаграмму. В ней произошло очевидное обращение времени (операция T), но, кроме того, перевернулись и все стрелки (операция C) и поменялись местами правое и левое (операция P). Таким образом, переворачивание диаграммы вверх ногами представляет собой применение к исходному физическому процессу всех трех преобразований C, P и T. Перевернутая вверх ногами фейнмановская диаграмма описывает истинный, физически возможный процесс. В общем случае он не будет совпадать с исходным процессом и может даже оказаться совершенно иным. Но, согласно теореме CPT, поскольку исходная диаграмма изображает реальный физический процесс, трижды преобразованная диаграмма также будет обладать этим свойством.

Чтобы рассмотреть результат одного лишь обращения времени, мы должны вернуться к старому направлению стрелок и пространственной симметрии. Для этого надо перевернуть книгу вверх ногами, посмотреть на полученную диаграмму в зеркало и вообразить, что направления стрелок изменились на проти-

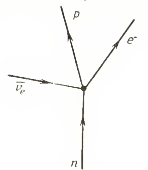
воположные. Полученная в результате этих манипуляций диаграмма иллюстрирует процесс, обращенный только во времени. Можно попытаться проделать и иные комбинации. Отражение в зеркале диаграммы с обращенными стрелками есть результат двойной операции *CP* и т. д.

То обстоятельство, что теорема *CPT* представляет собой закон сохранения, совсем не очевидно из-за того, что мы не знаем, какая же величина остается постоянной. Хотя и можно ввести «величину *CPT*», однако ее изучение не дает особых результатов. Гораздо больше пользы будет, если мы вспомним, что теорема *CPT*, подобно всем законам сохранения, представляет собой определенный запрет. Возможны только такие процессы, утверждает эта теорема, трехкратное преобразование которых (*CPT*) также представляет собой реальное физическое событие. Если процесс, полученный в результате таких преобразований, оказался бы запрещенным, то и исходный процесс не имел бы права на существование.

Фейнмановские диаграммы оказываются чрезвычайно полезными с точки зрения ясной и наглядной демонстрации той роли, которую играет и ряд других законов сохранения. Рассмотрим, например, основную электрон-фотонную вершину, изображенную на фиг. 34 и 35. Эти диаграммы для фундаментальных процессов уничтожения и рождения иллюстрируют несколько законов сохранения. В каждом событии, очевидно, сохраняется электрический заряд. Полный заряд на диаграммах равен либо $+1$, либо -1, либо 0 и имеет одну и ту же величину как ниже, так и выше вершины (т. е. до и после взаимодействия). Вершины демонстрируют также законы сохранения специфических зарядов ($+1$ для электрона, -1 для позитрона) и дают объяснение причине, по которой античастице приписывается отрицательный специфический заряд. На языке диаграмм закон сохранения электронного заряда просто означает, что в каждой вершине число «входящих» в нее электронных линий (одна в данном случае) равно числу «выходящих» электронных линий независимо от действительного направления стрелок во времени. Изображенный на фиг. 38 распад нейтрона представляет собой несколько более сложный

пример, демонстрирующий в явном виде сохранение электрического, барионного и электронного зарядов.

Большинство приведенных фейнмановских диаграмм в той или иной степени описывает действительно происходящие процессы. Этого нельзя сказать о нескольких диаграммах, в которых участвуют мимолетные промежуточные частицы. Так, диаграмма на фиг. 31, *д* описывает обмен двух нуклонов промежуточным «виртуальным» π-мезоном, что ведет к появлению взаимодействия между ними. Наблюдая только



ФИГ. 38. *Фейнмановская диаграмма для распада нейтрона.*

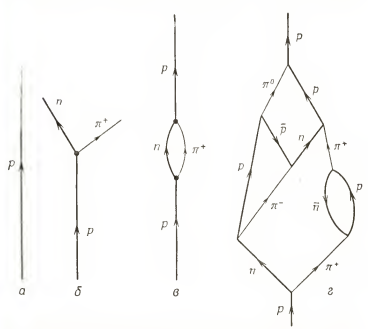
Одна барионная линия входит в вершину, а другая покидает ее. Один член электронного семейства (его нейтрино) «входит» в вершину, а электронная линия покидает ее. Так иллюстрируется закон сохранения различных зарядов.

нуклоны, экспериментатор должен из их поведения заключить, что на расстоянии около 10^{-13} *см* за время порядка 10^{-24} *сек* π-мезон переходит от одного из них к другому. Другие виртуальные частицы читатель может обнаружить на фиг. 33 и 36.

В главе шестой подчеркивалось, что виртуальные частицы играют особенно важную и блистательную роль в том, что мы называем самодействием. Мы хотим снова вернуться к этому явлению и дать ему наглядную иллюстрацию с помощью фейнмановских диаграмм. Свободным частицам присуща способность взаимодействовать самим с собой, и это позволяет нарисовать ясную картину новых представлений о строении микромира, картину непрерывных

и хаотических изменений, избежать которых не может ни одна частица.

Для начала мы могли бы предположить, что мировая линия отдельной свободной частицы, скажем протона, одиноко и неподвижно «сидящего» в свободном пространстве, имеет довольно скучный вид вертикальной прямой (фиг. 39, *а*). С точки зрения



ФИГ. 39. *Фейнмановская диаграмма для отдельного изолированного протона.*

макроскопического наблюдателя, эта линия — целая летопись. Остающаяся сама собой неподвижная частица выписывает во времени свой прямолинейный путь. Поскольку известно, что нуклоны и π-мезоны взаимодействуют между собой, то можно было бы поставить вопрос о возможности диаграммы, показанной на фиг. 39, *б*. Протон испускает положительный π-мезон и превращается в нейтрон, т. е. происходит фундаментальный процесс теории Юкавы, как

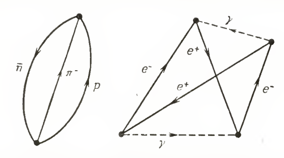
это иллюстрируют, например, вершины на фиг. 31, *д*. Однако легко видеть, что закон сохранения энергии запрещает протону участвовать в этом процессе в одиночку. Поскольку протон недвижим, его полная энергия в точности совпадает с энергией (массой) покоя. Однако сумма масс нейтрона и π-мезона значительно превышает массу протона. Для создания нейтрона и π-мезона просто не хватает избыточной энергии. Поэтому, как мы уже знаем, протон и не превращается в другие частицы.

Отказавшись от диаграммы фиг. 39, *б* и других диаграмм подобного же типа из-за запретов, налагаемых законами сохранения, мы, очевидно, будем вынуждены вернуться к диаграмме фиг. 39, *а*. Но после знакомства со следствиями принципа неопределенности Гейзенберга в предыдущей главе мы знаем, что природа охотно закрывает глаза на нарушения закона сохранения энергии, если они происходят в достаточно короткое время. Чем более вопиющим оказывается нарушение, тем короче должна быть его длительность. Это по-новому освещает диаграмму фиг. 39, *б*. Предположим, что нарушение закона сохранения энергии, происходящее в процессе, описываемом этой диаграммой, длится лишь очень короткое время. Это возможно. Если нейтрон снова поглотит π-мезон и превратится опять в протон, как это изображено на диаграмме фиг. 39, *в*, нарушение закона будет ограничено во времени. Вместо того чтобы позволить π-мезону улететь подобно свободной частице, ему никогда не предоставляют полной свободы. Он остается виртуальной частицей, поглощаемой вновь спустя 10^{-24} *сек* — самое большое время, в течение которого принцип неопределенности может допустить нарушение закона сохранения энергии.

Итак, мы должны заключить, что наш изолированный протон, если бы мы смогли увидеть его в достаточно мощный микроскоп, казался бы возбужденным и непрерывно испускал бы и поглощал π-мезоны, существуя часть времени в виде нейтрона. Это положение было описано в главе шестой без помощи фейнмановских диаграмм. Мы пришли к картине протона, в которой он выглядел окруженным роем виртуальных π-мезонов. «Мощным микроскопом»,

необходимым для того, чтобы увидеть это π-мезонное облако, в действительности оказались электроны высоких энергий, использованные в опытах Хофштадтера.

Возможность кратковременного нарушения закона сохранения энергии вызывает к жизни все виды сложных виртуальных процессов. Одна из последовательностей таких процессов, довольно устрашающего вида, но совершенно реальная, изображена на диаграмме фиг. 39, *г*. Каждый протон временами



ФИГ. 40. *Вакуумные диаграммы, иллюстрирующие временное существование частиц в пустом пространстве.*

проходит через весь этот ад, чтобы появиться на другом конце целым и невредимым, как и в любой другой извилистой цепочке превращений, не противоречащей законам сохранения и принципу неопределенности. Насколько нам известно, нарушение законов сохранения электрического и трех других зарядов недопустимо даже на мгновение. Поэтому эти законы соблюдаются в каждой вершине диаграммы фиг. 39, *г*. У каждой вершины есть «входящая» и «выходящая» барионные линии и π-мезонная линия. В целом эта диаграмма содержит протоны, антипротоны, нейтроны, антинейтроны и положительные, отрицательные и нейтральные π-мезоны.

Поскольку даже одинокая элементарная частица пребывает в состоянии непрерывного беспокойства, мы могли бы поинтересоваться тем, что́ происходит в еще более простой ситуации при наличии совершенно пустого пространства. Из теории поля сле-

дует, что пустое пространство отнюдь не пустыня, а весьма оживленное место. Во время мимолетных отступлений от закона сохранения энергии частицы могут возникать из ничего и снова исчезать. На фиг. 40 приведены «вакуумные диаграммы», демонстрирующие, чтó может происходить (и действительно происходит) в пустом пространстве. Пространство, беспрестанно заполненное всеми этими мгновенно возникающими и исчезающими частицами, называют «физическим вакуумом», чтобы отличить его от несуществующего «чистого вакуума». С этой же целью гипотетическую, совершенно инертную частицу на фиг. 39, *а* называют «голой частицей», чтобы отличить ее от реальной «физической частицы», которая часть времени проводит в состоянии активности, характеризуемом диаграммами, показанными на фиг. 39, *в* и *г*.

Чрезвычайная сложность диаграммы фиг. 39, *г* иллюстрирует специфическую особенность микромира, состоящую в наличии *хаоса*, вызванного фундаментальными процессами рождения и гибели и лежащего в основе *порядка*, устанавливаемого законами сохранения. Эта проблема взаимоотношения порядка и хаоса, которой мы уже неоднократно касались, со всей наглядностью иллюстрирует полный переворот в наших представлениях о мире, произошедший благодаря достижениям физики XX века.

Короче говоря, новые представления — это представления о хаосе *внутри* порядка, или, что то же самое, о порядке, который господствует над царящим в его более глубоких недрах хаосе. Такие представления находятся в поразительном контрасте со взглядами, утвердившимися на протяжении трех столетий от Кеплера до Эйнштейна, взглядами о господстве хаоса над порядком. Несмотря на случайный и неожиданный характер окружающего нас мира — так гласили старые доводы, — фундаментальные законы природы в своей основе просты и упорядочены, и поэтому природа на субмикроскопическом уровне в своей основе также проста и упорядочена. Кирпичи мироздания представляют собой простейшие

предметы, безликие, безразличные и одинаковые, сущность которых можно понять и предсказать; они движутся по орбитам, которые можно рассчитать, и взаимодействуют с остальными элементарными частицами по известным законам.

Это «классическое» представление о простоте и порядке прекрасно иллюстрируют современные вычислительные машины. Основные элементы машины, транзисторы, представляют собой простые предметы, каждый из которых может выполнять лишь элементарную функцию заранее известным и легко контролируемым способом. Можно извинить радиоинженеров за то, что они восторженно воспевают непревзойденное изящество и простоту транзисторов и законов, управляющих их действием. Но можно понять и обывателя, когда он считает транзисторы в общем довольно скучной штукой. Однако и тот, и другой должны согласиться, что, когда несколько миллионов транзисторов соединяются надлежащим образом, возникает сложный организм с исключительно разнообразными функциями и особенностями поведения. Несколько миллионов — число достаточно скромное, и инженер еще может предсказать, что предпримет машина в самых разнообразных обстоятельствах, но даже он будет поражен сложностью системы, которая проявляется просто в ее размерах.

Таким было до последнего времени представление об устройстве физического мира. В основе беспорядочных и сложных явлений, доступных нашим органам чувств, лежали простые предметы и простые законы, т. е. основу всего составлял порядок. Задача науки состояла в том, чтобы вскрыть этот порядок и попытаться проникнуть в более глубокие и более простые недра природы, и на протяжении нескольких последних веков эта задача решалась с беспримерной быстротой и успехом.

Однако в нашем столетии теория относительности и квантовая механика вместе с экспериментальными данными о мире элементарных частиц обнаружили наличие хаоса, лежащего в более глубоких недрах природы и носящего фундаментальный характер. Оказалось, что бытие частиц скоротечно, а пустое пространство, подобно улью, заполнено

беспорядочным движением. Динамические законы уступили место вероятностным, изолированные частицы оказались вовлеченными в непрестанный неистовый танец, полный неожиданных па. Принцип неопределенности не допускал, чтобы на микромир бросали чересчур пристальные взгляды или проводили в нем точные измерения.

Это не означает, что старые представления о простоте малого и сложности большого полностью отброшены. Д .же будучи крайне подвижным, электрон по-прежнему остается простым предметом; в микромире все также господствуют наиболее фундаментальные законы природы; по-прежнему сохраняет реальность та сложность, которую вносили размеры и устройство вещей. Переворот проявлялся прежде всего в том, что порядок оказался лежащим в основе не взаимодействий и *активности* элементарных частиц, а в отвергающих *насилие* законах сохранения. В основе картины строения мира лежит почти неограниченный хаос, подчиненный ряду сдерживающих законов. Возник мир, в котором, казалось, все, что *могло* происходить, подвергаясь лишь ограничению со стороны законов сохранения, *действительно происходит*. Поля и частицы микромира оказались похожими на непокорные существа, которые любыми средствами пытались делать то, что не было запрещено законами сохранения.

Не окажется ли этот царящий в природе фундаментальный хаос преходящим явлением в науке, которое будет заменено в будущем более глубоким порядком? Возможно и так. Пока нет никаких данных, на которых мы могли бы основывать свой ответ на этот вопрос. Однако следует указать на две основные возможности. С одной стороны, при более близком рассмотрении может оказаться, что элементарные процессы рождения и гибели, происходящие, как это кажется в настоящее время, в виде катастроф в отдельной точке пространства-времени, в действительности состоят из скоротечной, но плавной и более упорядоченной цепи следующих друг за другом событий. Может оказаться, что вероятность в квантовой механике основана лишь на крайней сложности тех вещей, которые мы пока считаем про-

стыми. С другой стороны, картина микромира, нарисованная нашим воображением, вполне может оказаться еще более хаотичной. В нашей картине строения мира, развитой до сих пор, не участвовало само по себе пространство-время. В то время как возникают и исчезают поля и частицы, пространство и время остаются нейтральными, создавая своего рода подмостки, на которых актеры разыгрывают свои роли. Есть основания думать, что в будущей теории элементарных частиц пространство и время будут не просто подмостками, а превратятся в действующих лиц. Если это так, то роковое переплетение пространства и времени и (или) квантование пространства-времени могут привести к появлению в картине строения мира еще большего хаоса.

Следует подчеркнуть, что, в каком бы направлении не развивалась будущая теория (рассуждение на эту тему, — по-видимому, бесполезная потеря времени, вряд ли это принесет какие-либо плоды), она скорее всего дополнит современную теорию, а не отвергнет ее. Подобно тому как ньютоновская механика остается вполне пригодной для описания движения планет, современная теория элементарных частиц, по-видимому, сохранится для описания всех тех особенностей мира элементарных частиц, которые уже получили количественное объяснение. Тем не менее это самая глубокая теория, которая наиболее сильно влияет на наши представления об *устройстве мира,* и эти представления могут претерпеть в будущем значительные изменения.

ГЛАВА
ВОСЬМАЯ

Новые принципы симметрии

Вещи и события, что есть и что происходит — этим исчерпывается содержание физического мира и предмета науки. Рука об руку с эволюцией нашего представления о фундаментальных *кирпичах мироздания,* лежащих ныне на уровне квантовых полей с их корпускулярными образами—элементарными частицами, происходило формирование более глубоких и более содержательных законов, описывающих поведение этих предметов.

Однако до сих пор дело обстояло так, что понимание природы событий чуть-чуть опережало понимание природы вещей. Успешное представление о том, что́ происходит на каждой ступени строения вещества, предшествовало пониманию природы тех кирпичей, из которых состоит само вещество. Рассмотрим, к примеру, наручные часы. Состоят они из множества деталей — пружин, маятника, шестеренок, камней, собранных в единое целое. Часовщик очень хорошо представляет себе работу часов, не понимая, однако, природы их

частей. Колебания маятника и расширение деталей часов при нагреве можно описать математически, но часы можно собрать с удивительной точностью, не зная истинной природы частей, т. е. почему пружины обладают упругостью, почему металл при нагревании расширяется, какова структура камней. Обратимся не к очень далекому прошлому, скажем к 1800 г. В то время изготовлялись очень точные часы, хотя никто, включая и самих часовщиков, не понимал истинной природы твердого тела.

Если мы посмотрим глубже, скажем внутрь кусочка металла в часах, и оглянемся на 1900 г., то увидим, что в то время твердое тело представляли себе как собрание атомов. Упругость твердого тела объясняли силами, действующими между атомами, а расширение при нагревании относили за счет усиления колебательных движений атомов. *Явления*, происходящие в твердом теле, были поняты, а вот составные *части* его — атомы — нет. Они оставались мельчайшим строительным материалом, природа и причины существования которого сохранили свою загадочность.

Наконец, спустя четверть века после того, как были раскрыты тайны атомов, мы вновь столкнулись с еще не имевшими объяснения предметами — протонами, нейтронами и электронами. В наши дни физикам удалось (пока неполностью) объяснить поведение элементарных частиц без сколько-нибудь глубокого понимания природы поля (или полей), представляющего собой субстрат частиц. Но есть ряд новых указаний, открывающих одну из наиболее заманчивых перспектив в современной физике, указаний на то, что мы достигли слияния описаний событий и вещей, что теория, описывающая поведение частиц, и теория строения и природы частиц могут оказаться одним и тем же.

Успех в понимании процессов, происходящих в мире элементарных частиц, в значительной степени связан с законами сохранения. Как уже подчеркивалось, существуют многочисленные причины, по которым эти законы, провозглашающие постоянство в процессе изменения, выдвинулись на авансцену микромира. Законы сохранения, по-видимому, проще большинства остальных законов, потому что они концен-

трируют внимание на том, что́ остается в природе постоянным, а не на том, что́ меняется. Благодаря их связи с очень общими, в ряде случаев «самоочевидными» принципами симметрии эти законы оказываются глубже других законов природы. Обе причины придают законам сохранения неповторимую прелесть.

С практической точки зрения увеличение числа законов сохранения укрепляет веру в то, что сами по себе законы сохранения смогут составить полный свод законов, из которых будут следовать все остальные. Поэтому мы закончим книгу обсуждением новых и довольно неожиданных законов сохранения, управляющих миром элементарных частиц: в предыдущих главах мы вкратце касались большинства из них. Четыре новых принципа симметрии, на которых мы намерены остановиться здесь, наряду с семью абсолютными законами сохранения, рассмотренными в главе четвертой, и сохранением странности, обсуждавшейся в главе шестой, почти полностью исчерпывают список известных законов управляющих поведением элементарных частиц.

Очень может быть, хотя и не наверняка, что законы сохранения составляют полный свод законов, необходимых для описания *событий* в мире элементарных частиц. Гораздо менее определенной, хотя и вполне возможной, является привлекательная идея о том, что те же самые законы сохранения составляют основу и для понимания природы *вещей* в мире элементарных частиц, т. е. самих частиц. Во всяком случае может оказаться, что человек достиг такого уровня понимания, на котором исчезло различие между тем, что́ есть, и тем, что́ происходит, где сами представления о составных частях природы и их взаимодействии друг с другом оказались тождественными.

Что представляют собой эти предварительные намеки на слияние вещей и событий? Прежде всего можно сослаться на то, что́ составляет материальную основу окружающего нас макромира. Одни и те же законы сохранения объясняют распад нестабильных частиц и *отсутствие распада* электронов и протонов. Устойчивость основных кирпичей мироздания покоится на тех же законах сохранения, кото-

рые объясняют неустойчивость и взаимодействия остальных частиц.

Рассмотрим для определенности закон сохранения электрического заряда. На нем основана стабильность электрона — прочного строительного материала Вселенной. Однако и *поведение* электрона частично покоится на этом же законе, ибо характер взаимодействия электронов с фотонами тесно связан с существованием закона сохранения заряда.

Возвращаясь к фиг. 39 (стр. 269), напомним, что даже изолированная частица должна испытывать взаимодействия. Частица как раз и *представляет собой* поля во взаимодействии. Вполне возможно, что ее масса и прочие свойства вовсе не врожденные, а появляются в результате взаимодействия этих частиц со всеми прочими частицами, причем характер этих взаимодействий в свою очередь диктуется законами сохранения. Вследствие существования самодействия бытие и явления оказываются неразрывно связанными друг с другом. Это новый элемент в научном представлении о мире, существующий примерно на протяжении лишь последних тридцати лет. И его важность, вероятно, будет все возрастать.

Существует и ряд других указаний о слиянии вещей и событий, носящих, однако, более специальный или более сомнительный характер. Среди первых — новая теория «матрицы рассеяния», которая вообще упраздняет поля и частицы как элементы бытия. Эта теория (характер успеха которой пока остается весьма неопределенным) представляет собой дерзкую попытку вообще лишить *вещи* их роли основных элементов. Вместо этого фундаментальное значение, согласно этой теории, приобретают взаимодействия, ограниченные законами сохранения и дополненные сохраняющимися величинами, такими, как энергия и импульс. В этой теории элементами физического мира становятся последовательности взаимодействий. Бытие существует постольку, *поскольку* существует явление. Трудно вообразить себе взгляды, которые отличались бы более радикально от классических представлений о материальной основе мира.

Среди более сомнительных новых идей есть то, что часто называют «геометризацией физики». Она

состоит в том, что пространство и время считают единственными действующими лицами, единственной пьесой и единственными подмостками природы, т. е. единственными проявлениями фундаментальной четырехмерной геометрии пространства-времени. Если один из этих новых подходов (в основе всего — события, а вещи — вторичное или же в основе всего — пространство-время, а вещи и события — вторичные) окажется плодотворным, мы явимся свидетелями еще одного глубокого переворота в представлениях о мире.

Чтобы избежать специальных определений, мы до сих пор не очень точно разграничивали выражения «закон сохранения» и «принцип симметрии». Однако между ними существует разница (она обсуждалась в главе четвертой), о которой, может быть, стоит напомнить здесь, так как в этой главе нам предстоит обсудить три принципа симметрии и один закон сохранения. Принцип симметрии (инвариантности) утверждает, что все законы природы остаются неизменными при изменении (реальном или мысленном) экспериментальных условий. Масса μ-мезона в Чикаго и в Нью-Йорке одинакова вследствие инвариантности относительно перемены места (однородности пространства). Если в каком-либо эксперименте все частицы заменить античастицами и наоборот, то новый опыт будет удовлетворять все тем же законам. Это принцип симметрии, в случае которого практическое изменение условий может оказаться делом далеко не легким. С другой стороны, закон сохранения утверждает, что в происходящем в действительности физическом процессе некоторая физическая величина остается неизменной. Утверждение, что полная энергия после процесса соударения остается такой же, какой она была до соударения, представляет закон сохранения.

В этих понятиях имеются два существенных различия. В случае принципа симметрии неизменными остаются законы природы, а в случае закона сохранения изменению не подвергается какая-либо физическая величина. В формулировке принципа сим-

метрии мы имеем дело с изменениями условий, которые, возможно, даже не осуществимы на практике; в случае закона сохранения речь идет о действительном физическом изменении. Отметим также различие в утверждении общего и специфичного. Согласно принципу симметрии (инвариантности), *все* законы остаются неизменными при конкретном изменении условий, а, согласно закону сохранения, *определенная* величина остается неизменной при *всех* возможных физических процессах.

Очень важное, хотя и далеко не очевидное положение состоит в том, что каждому принципу симметрии соответствует закон сохранения и, наоборот, каждый закон сохранения покоится на принципе симметрии. Эта связь, которая зиждется лишь на веских основаниях, но не на строгом доказательстве, была проиллюстрирована в главе четвертой на примере связи закона сохранения импульса с инвариантностью относительно изменения места. То обстоятельство, что для некоторых законов сохранения не известны соответствующие им принципы симметрии, достаточно ясно демонстрирует непрочный характер упомянутой связи. Даже в тех случаях, когда известно о ее существовании, эта связь кажется сверхъестественной. Уже тот факт, что столь всесильный и вездесущий закон, как закон сохранения энергии, можно получить просто из инвариантности относительно смещения во времени (т. е. из того факта, что законы природы сегодня остались такими же, какими были вчера), говорит об исключительных возможностях принципов симметрии.

Обращение течения времени

Иногда, чтобы позабавить публику, часть кинофильма пускают задом наперед, показывая, например, как из воды сначала появляются ноги спортсмена, затем поднимается в воздух он сам и приземляется на трамплин (совершенно сухой, аккуратно причесанный, с нормальным пульсом). Всем ясно, что ленту прокрутили наоборот, так как последовательность, в которой были показаны все события, «невозможная».

Однако те же события, показанные в другом порядке, т. е. прыжок с трамплина в воздух, а затем в воду,— вполне возможная и обычная последовательность. Но допустим, что какой-то дотошный зритель предположит, что кто-то действительно смог научиться плавать назад с такой скоростью и так ловко, что ему удалось выбросить из воды сначала ноги, а затем вскочить на трамплин, как было показано в фильме. С большой натяжкой он мог бы это допустить, но возможно ли все это на самом деле? Можем ли мы быть абсолютно уверены в том, что нам показали фильм правильно, а не задом наперед? Этому ярому стороннику определенности можно было бы противопоставить такое количество веских аргументов, что он, вероятно, быстро сложил бы оружие и присоединился к общему мнению. Каким образом, можно было бы спросить его, этот искусный пловец, выскочив из воды, ухитрился привести в порядок свои всклокоченные волосы? Как, появившись в воздухе, он умудрился мгновенно высохнуть? Почему уменьшилась частота его пульса, хотя он энергично двигался в воде? Как ему удавалось, находясь под водой, глотать пузырьки воздуха, которые чудесным образом собирались ему в рот? Что привело в движение трамплин до того, как он достиг его? Почему исчезла небольшая царапина на его ноге, которую он посадил о торчащий гвоздь, выбираясь из воды? Ну после этого дотошный зритель, безусловно, сдастся. Конечно, он будет вынужден уступить. Фильм определенно показывали задом наперед.

Инвариантность относительно обращения времени можно просто продемонстрировать с помощью гипотетического фильма. Если снять на кинопленку любой физический процесс или последовательность событий и показать ленту задом наперед, то зрители увидят нечто такое, что может происходить в действительности. Говоря несколько специальным языком, любая последовательность событий, выполненных в обратном порядке, представляет собой также физически возможную последовательность событий. Это приводит к весьма неожиданному выводу, что, следя за снятыми на кинопленку событиями в природе, нельзя установить, в каком направлении, прямом или обратном, демонстрировался фильм. Каким образом

можно совместить этот принцип с теми противоречиями со здравым смыслом, на которые мы наталкиваемся при демонстрации фильма о прыгуне задом наперед или в тысяче других примеров (представьте себе обращенные во времени стрижку волос, запуск ракеты или печатание на машинке)? Не означает ли все это, что инвариантность относительно обращения времени не имеет места в макромире? Нет, насколько нам известно, инвариантность относительно обращения времени носит абсолютный характер и имеет столь же универсальную применимость, что и абсолютные законы сохранения, обсуждавшиеся в главе четвертой. Ей подчиняются все взаимодействия в микромире и предположительно все события макромира. Ключ к решению парадокса состоит в уяснении того обстоятельства, что «возможно» не означает «вероятно». Хотя самопроизвольное собирание осколков взорвавшейся бомбы в целую бомбу и кажется нам диким, невероятным фактом, однако это не невозможно. В таком событии ни один из законов природы не нарушается.

Обсуждая инвариантность относительно обращения времени в обычном окружающем нас мире, мы вплотную подходим к важному вопросу, который, однако, выходит за рамки настоящего обсуждения. Когда маловероятное становится столь невероятным, что его следует считать невозможным? Достаточно сказать, что в действительности этот предел достигается для всех обращенных во времени событий, которые происходят в окружающем нас и в высшей степени сложном макромире. Мы могли бы прождать в миллиард раз дольше, чем существует Вселенная, без всякой надежды встретить обращение во времени какого-либо, пусть даже самого простого процесса, как, например, разрывание пополам листа бумаги. И тем не менее важно представлять себе, что обращенные во времени процессы в принципе возможны.

Инвариантность относительно обращения времени представляет собой нечто большее, нежели игру случая. Чтобы показать это, рассмотрим процессы, значительно более простые, нежели обсуждавшиеся до сих пор. Допустим, что космонавт, отправившийся в другую галактику, захватил с собой кинофильм о

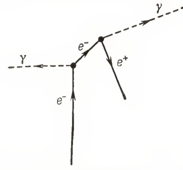
нашей Солнечной системе, чтобы показать его там. Если фильм был снят из точки, удаленной в направлении Полярной звезды на расстояние сотен миллиардов километров, то планеты будут выглядеть крохотными точечками, описывающими эллиптические орбиты вокруг Солнца в направлении по часовой стрелке. Обитатели другой галактики, хорошо знакомые с законами механики, с интересом просмотрели бы фильм и пришли бы к выводу, что здесь все верно, что фильм дает истинную последовательность событий. Но даже если бы им прокрутили фильм задом наперед, и это не убедило бы их в другом. Хотя движение планет в обратном направлении в действительности и не происходит, ибо планеты так не движутся, тем не менее это «возможно», ибо совместимо с теми же законами механики.

Пусть наш космонавт отправится в другую галактику, обитатели которой умны и знакомы с математикой, но не имеют научных познаний. Для одной группы этих обитателей фильм о движении планет будет показан правильно, а другой — задом наперед. Затем космонавт попросит каждую группу из того, что они видели, вывести закон всемирного тяготения и законы механического движения. Если у них у всех вместе окажется столько же ума, сколько у Ньютона, то общими усилиями они придут к правильным и одинаковым законам.

В этом и состоит истинное значение инвариантности относительно обращения времени. При гипотетическом изменении направления течения времени все законы природы остаются неизменными. В такой формулировке подчеркивается *инвариантность*. Чтобы подчеркнуть *ограничение*, налагаемое законом, его необходимо сформулировать несколько иначе. Может происходить только то, что могло бы произойти и в обратном порядке. Или, еще более негативно, если обращенный во времени процесс невозможен, то и сам процесс не должен происходить.

Наиболее простое применение инвариантность относительно обращения времени находит в мире элементарных частиц, где она как бы управляет всеми взаимодействиями — сильным, слабым и электромаг-

нитным[1]). На фиг. 41 показана, к примеру, аннигиляция электрона с позитроном. Обращенный процесс, также возможный, представляет собой рождение пары электрон — позитрон при столкновении двух фотонов. Напомним смысл направлений, приписанный в главе седьмой обращенной во времени фейнмановской диаграмме. Переверните страницу вверх ногами, взгляните на нее в зеркало и мысленно переверните направления стрелок. Тогда вы увидите, что линии двух фотонов сходятся снизу вверх, а линии электрона и



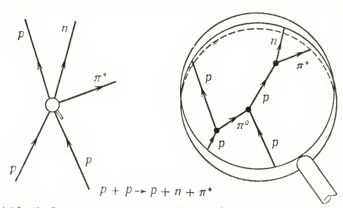
ФИГ. 41. *Фейнмановская диаграмма для процесса аннигиляции электрона с позитроном.*

позитрона расходятся вверх. Согласно инвариантности относительно обращения времени, этот процесс не только возможен, но и будет происходить во всех подробностях как обращенная последовательность фундаментальных взаимодействий. Поскольку «сила» взаимодействия в каждой из вершин остается неизменной, то существует определенное числовое соотношение между вероятностью образования пары и вероятностью аннигиляции пары, предписываемое законом.

Роль вероятности в реализации обращенных во времени процессов, столь очевидная в случае возвращения прыгуна из воды на трамплин, проявляется и

[1]) В 1964 г. на Международной конференции в Дубне были сообщены экспериментальные данные, полученные Кронинным и Фитчем (США), о наличии у долгоживущего K^0-мезона редких случаев распада (примерно 1 на 1000) на два π-мезона. Эти результаты говорят о нарушении инвариантности относительно обращения времени в указанном процессе, обусловленном слабыми взаимодействиями. — *Прим. перев.*

в мире элементарных частиц. Например, простой процесс рождения π-мезона практически нельзя обратить. Столкновение двух протонов может привести к появлению протона, нейтрона и положительного π-мезона, как показано на фиг. 42. Для осуществления обращенного во времени процесса потребуется почти одновременное столкновение трех частиц — событие слишком невероятное, чтобы оно могло действительно



ФИГ. 42. *Образование π-мезона при соударении двух протонов.* Обращенный во времени процесс возможен, однако его вероятность много меньше, чем для прямого процесса.

произойти. Однако требование инвариантности *каждого* фундаментального процесса по отношению к обращению времени ограничивает возможные виды взаимодействия π-мезона с нуклоном и тем самым существенно влияет на процессы, протекающие в прямом направлении, независимо от вероятности и возможности экспериментального наблюдения обращенного во времени процесса. Это исключительно важная сторона принципов симметрии, с которой связана все возрастающая роль этих принципов в физике. Инвариантность относительно обращения во времени частично влияет и на законы механики, которым подчиняется наш прыгун в воду. Поэтому то, как изогнется в воздухе прыгун, определяется отчасти инвариантностью относительно обращения во времени, даже если совершенно не может быть и речи о том, чтобы он повторил «прыжок» в обратном порядке.

Все, с чем мы сталкиваемся повседневно, убеждает нас в одностороннем течении времени, безвозвратности ушедшего. Однако изучение взаимодействий элементарных частиц обнаруживает как раз полное равноправие обоих направлений течения времени. Законы природы полностью симметричны относительно будущего и прошлого. Эта загадка находит свое решение в представлении о вероятности. Для любой заданной последовательности событий определенный порядок их осуществления будет более вероятен, нежели противоположный. Для чрезвычайно простых событий, происходящих в мире элементарных частиц, данный и обращенный во времени процессы могут оказаться почти равновероятными. Но чем сложнее и запутаннее последовательность событий, тем в большей степени вероятность одного порядка преобладает над вероятностью противоположного порядка. Поскольку все, о чем человек имеет непосредственное представление в мире элементарных частиц, оказывается исключительно сложным, течение событий мы видим лишь в направлении, соответствующем большей вероятности, и это направление мы считаем «истинным» направлением времени. Есть заманчивая идея, согласно которой единственная причина знакомства человека с прошлым и полной неосведомленности его о будущем — это сложность и высокая организованность его мозга. Но и более простые существа, к сожалению, оказываются не в лучшем положении. У них будущее и прошлое оказываются равноправными только потому, что они лишены памяти. Один электрон абсолютно схож с любым другим электроном и не несет на себе печати ни прошлого, ни будущего. Человеческого разума оказывается достаточно, чтобы человек помнил прошлое, но, наделив человека памятью, природа хранит от него в тайне будущее.

Четность

Инвариантность относительно изменения четности, т. е. инверсии пространства, утверждает существование симметрии между миром и его отражением в зеркале. Сформулируем этот принцип по аналогии с ин-

вариантностью относительно обращения времени. Зеркальное отражение любого физического процесса представляет собой возможный физический процесс, которым управляют те же законы, что и исходным процессом. Почти все люди ежедневно применяют операцию изменения четности, рассматривая себя в зеркале. В зеркальном отражении большинства вещей или событий нельзя обнаружить ничего «странного». Отражение в зеркале не является «истинным», однако выглядит оно вполне разумным и допустимым. Чье-то отражение в зеркале может и не оказаться точной копией какого-то другого человека, но мы готовы поверить, что действительный человек *мог бы* походить на это отражение как две капли воды.

The mirror view of a printed page looks "wrong." It is obviously quite different from the direct view of the page. But there is nothing impossible about it. A printer could design inverted type and produce a page which, viewed directly, would be identical with the mirror view of the normal page. Most children put this symmetry to work by learning "mirror writing," which appears normal only when viewed in a mirror (see Figure 8.3).

ФИГ. 43. *Операция зеркального отражения, примененная к печатной странице.*

Отражение в зеркале печатной страницы выглядит «опечаткой». Оно, естественно, совершенно не похоже на саму страницу. Однако в этом нет ничего невозможного. Печатник мог бы создать обращенный шрифт и напечатать страницу, которая была бы точно идентична с зеркальным отражением правильной страницы. Большинство детей используют эту симметрию, читая «зеркальное письмо», которое можно прочесть, только когда на него смотрят в зеркало (фиг. 43).

Положение дел с пространственной инверсией обычного мира совершенно не похоже на ситуацию с обращением времени. Отраженный в зеркале мир выглядит в общем вполне обычным, и мы готовы поверить в сохранение четности или инвариантность относительно пространственной инверсии. Но ведь обращенный во времени мир выглядит нелепым и невоз-

можным и вынуждает нас сопротивляться представлению об инвариантности относительно обращения времени. Что же касается элементарных частиц, то они дурачат нас в обоих случаях. До последнего времени казалось, что инвариантность относительно обращения времени является абсолютным законом[1]), тогда как инвариантность относительно пространственных инверсий — частный закон сохранения, нарушаемый слабыми взаимодействиями. Это означает, что отражение в зеркале действительного процесса, вызванного слабыми взаимодействиями, такого, как β-распад, соответствует тому, что *не может* происходить на самом деле. Даже ученые, позабыв обычные предосторожности, начали считать сохранение четности абсолютным законом. И когда в 1956 г. подтвердились предсказания Ли и Янга о том, что слабые взаимодействия *нарушают* зеркальную симметрию[2]), то это явилось потрясением для ученых и напомнило им, что непроверенные теории — это дом, построенный на песке.

Для иллюстрации сохранения четности в окружающем нас мире лучше воспользоваться не зеркалом, а диапроектором или кинопроектором. Большинство людей так привыкло к зеркалам, что мысленно восстанавливает пространственную инверсию в зеркальном изображении. А проектор позволяет внести элемент загадочности, и это делает инвариантность более очевидной. Если вам покажут на экране незнакомый пейзаж, вы не сможете сказать, правильно ли поставлен диапозитив или обратной стороной. В любом случае все будет выглядеть вполне разумно и реально. Даже если кинопленка перевернута на другую сторону, то очень трудно решить, что мы смотрим — истинную или отраженную картину. Конечно, если девять из десяти действующих лиц окажутся левшами, или все автомашины в американском городе будут двигаться по левой стороне, или надпись на указателе окажется

[1]) См. в связи с этим примечание на стр. 285. — *Прим. перев.*

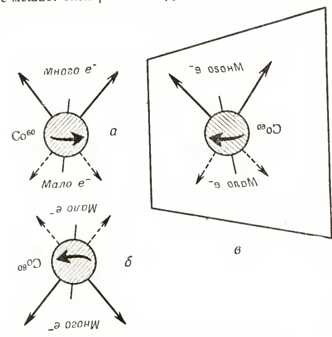
[2]) За предсказание этого факта и связанные с ним исследования Ли и Янг были удостоены Нобелевской премии по физике за 1957 г. В то время, когда был брошен вызов закону сохранения четности, Ли было 29 лет, а Янгу — 33 года.

шиворот-навыворот, то секрет обнаружится. Но даже при наличии этих улик, выдающих то, что происходит, в перевернутом фильме не будет ничего такого, что противоречило бы здравому смыслу или казалось бы совершенно невозможным. И это не просто случайность. То обстоятельство, что зеркальное изображение обычного мира выглядит вполне реальным, непосредственно связано с тем, что все законы природы, управляющие макромиром, удовлетворяют инвариантности относительно пространственных инверсий. Если это не так, если, к примеру, слабые взаимодействия както влияли на наше восприятие, мы, безусловно, должны были бы знать, что зеркальное отражение истинной последовательности событий физически невозможно.

Впервые свет на несохранение четности в слабых взаимодействиях был пролит с помощью радиоактивного ядра Co^{60}, того самого ядра, которое может оказаться главной угрозой для жизни людей в случае ядерной войны. В своей сущности опыт, который проделала Ву, был исключительно простым. Ядра кобальта были выстроены таким образом, чтобы их врожденное вращательное движение (если смотреть сверху) происходило по часовой стрелке. Взгляните на фиг. 44, где изображено ядро Co^{60}, «северный полюс» которого смотрит вверх, а «южный» — вниз. В опыте большое число ядер Co^{60} было выстроено точно таким же образом. Затем оказалось, что ядра, претерпевая одно за другим внезапный β-распад, испускают электроны, вылетающие преимущественно вверх. Жирные прямые стрелки обозначают направление преимущественного вылета электронов. Далее, при отражении этого процесса в зеркале ядро Co^{60} кажется вращающимся в противоположном направлении, но электроны по-прежнему вылетают преимущественно вверх. (Следует, конечно, помнить, что отдельное ядро Co^{60} может испустить только один электрон.) Если, с другой стороны, всю экспериментальную установку, включая все ядра, перевернуть вверх ногами, то изменится направление вращения всех ядер, *а также* направление вылета большинства электронов. Мы приходим к неизбежному выводу, что переворачивание вверх ногами и отражение в зеркале исходного процесса несовместимы.

друг с другом. Один из них (или оба!) должен быть невозможен.

Нам сразу хочется сказать, что, очевидно, возможен процесс, перевернутый вверх ногами. Ведь ничто не мешает экспериментатору перевернуть свой прибор



ФИГ. 44. *Распад ориентированного ядра* Co^{60}.

а — нормальный вид; *б* — перевернутый вид; *в* — отраженный в зеркале. Везде смысл имеют лишь физически измеримые величины.

вверх ногами или, еще проще, самому встать на голову, чтобы по-иному взглянуть на процесс. Это, очевидно, допустимо, но важно иметь в виду, что эта очевидность покоится на симметрии (изотропии) пространства, которая лежит в основе закона сохранения момента количества движения. То, что выполненный вверх ногами опыт должен дать тот же результат, что и исходный эксперимент, «очевидно» постольку, поскольку повседневные ощущения заставляют нас принять инвариантность законов природы относительно

вращений как самоочевидную истину. На самом деле у нас есть веские аргументы, чтобы принимать сохранение момента количества движения и изотропию пространства как абсолютные законы. Таким образом, β-распад Co^{60} вверх ногами — процесс физически, безусловно, возможный.

Для того, кто с равным убеждением верит в инвариантность законов природы относительно пространственной инверсии, столь же «очевидно» было бы также и физическое равноправие отраженного в зеркале процесса. В таком положении находилось большинство физиков. Все классические законы физики обладают зеркальной симметрией, и было известно, что в мире элементарных частиц этой симметрией обладают сильные и электромагнитные взаимодействия. Сохранению четности грозила судьба самоочевидной истины. И все же зеркальное отражение опыта с Co^{60} — определенно невозможный процесс. Инвариантность слабых взаимодействий относительно зеркальных отражений нужно отбросить. Следует допустить, что даже для физиков здравый смысл, почерпнутый из повседневного опыта, по-прежнему остается более грозной силой, нежели здравый смысл, основанный на математической интуиции. Крушение инвариантности относительно пространственных вращений вызвало бы в научном мире несравненно более бурное волнение, чем это произошло в результате падения инвариантности относительно пространственных отражений.

Представим себе, что живут некие крохотные существа, на повседневной жизни которых очень сказываются слабые взаимодействия. Эти существа нашли бы, вероятно, зеркальное отражение распада Co^{60} весьма занятным. Они сразу поняли бы, что это совершенно невозможное событие, и, вероятно, считали бы его таким же забавным, как нам кажется картина вылетающего из воды ногами вперед прыгуна.

Значение любого закона сохранения или принципа симметрии состоит в том, что он ограничивает свободу природы. В случае опыта с Co^{60} зеркальная симметрия потребовала бы, чтобы вверх и вниз вылетало в точности одинаковое число электронов, т. е. распределение вылетающих электронов было бы в точности

симметрично относительно верха и низа, ибо только в этом случае вид «вверх ногами» совпал бы с изображением в зеркале. При нарушении сохранения четности это ограничение отпадает и у электронов появляется возможность вылетать любым способом (совместимым с *прочими* законами сохранения).

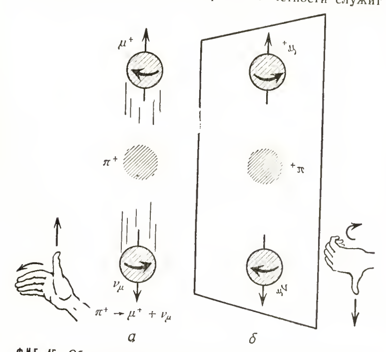
Как могло случиться, что между моментом открытия β-распада и обнаружением нарушения зеркальной симметрии в β-распаде прошло более 50 лет? Тому была простая причина. Эксперимент с Co^{60} значительно сложнее, чем это следовало из нашего обсуждения. Трудно выстроить в ряд ядра так, чтобы они вращались в одном направлении, ибо на них трудно найти «управу». Но, будучи однажды выстроены, ядра стараются перевернуться и вскоре оказываются снова совершенно дезориентированными. С попытками выстроить ядра в определенном порядке постоянно воюет тепловое возбуждение, которое присутствует в каждом материале. Ясно, что опыт с Co^{60} был бы бесполезным, если бы половина ядер вращалась в одном направлении, а вторая половина — в другом. В подобном случае вверх и вниз вылетало бы одинаковое число электронов, и из опыта ничего не удалось бы узнать об инвариантности относительно зеркального отражения. Чтобы выстроить ядра в ряд и заставить их сохранять ориентацию, Ву заручилась поддержкой группы сотрудников Национального бюро стандартов, являющихся специалистами по получению очень низких температур. При температурах, превышающих абсолютный нуль не более чем на 0,1 градуса, тепловое возбуждение настолько затихает, что ядра кобальта могут сохранять ориентации спинов и желаемый эксперимент[1]) можно провести.

Среди многочисленных доказательств нарушения зеркальной симметрии нет более простых и более убедительных, чем обнаружение левовинтового характера нейтрино. Отражением в зеркале левовинтового ней-

[1]) В действительности температуру ниже 1° К не удается поддерживать очень долго. Кобальт охлаждался примерно до $^{1}/_{100}$ градуса, и измерения проводились 10 *мин*, в течение которых хорошо изолированный материал нагревался до 1° К.

трино служит правовинтовое нейтрино (фиг. 45), но в природе нет такового; таким образом, зеркальное отражение оказывается невозможным.

До сих пор основной акцент ставился на *нарушении* сохранения четности, но во всех взаимодействиях, кроме слабого, закон сохранения четности служит



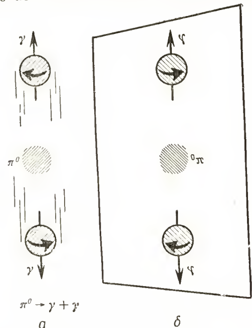
ФИГ. 45. *Образование левовинтового нейтрино при распаде положительного π-мезона (а) и его правовинтовое отражение в зеркале (б).*

сильным и действенным средством ограничения происходящего. Например, если бы ядра Co^{60} испытывали не β-распад, а γ-распад, то вверх и вниз испускалось бы одинаковое число фотонов. В этом случае в игре участвовали бы только электромагнитные взаимодействия (а не слабые) и зеркальная симметрия требовала бы симметричного результата.

Аналогично, распад нейтрального π-мезона на два фотона

$$\pi^0 \to \gamma + \gamma,$$

возникающий в результате комбинированного действия сильного и электромагнитного взаимодействий, совершенно не похож на слабый распад заряженного



ФИГ. 46. *Распад нейтрального π-мезона* (*а*) *и его отражение в зеркале* (*б*).

Поскольку взаимодействие, управляющее этим распадом, инвариантно относительно зеркального отражения, то это отражение представляет собой возможный способ распада нейтрального π-мезона. Фотоны могут быть либо левовинтовыми, либо правовинтовыми.

π-мезона. Допустим, что, подобно μ-мезону и нейтрино на фиг. 45, в каком-то распаде возникли левовинтовые фотоны. В отраженном в зеркале процессе (фиг. 46) фотоны будут правовинтовыми, и, согласно зеркальной симметрии, распад на правовинтовые фотоны также возможен. На самом деле необходимо, чтобы распад на правовинтовые фотоны имел в точ-

ности ту же вероятность, ибо все законы природы (управляющие *данным* процессом) одинаковы как в реальном мире, так и в мире за зеркалом. Если бы в реальном мире происходил главным образом распад на левовинтовые фотоны (но с небольшим преимуществом), то в отраженном в зеркале мире с тем же преимуществом возникали бы правовинтовые фотоны и это означало бы нарушение инвариантности относительно пространственной инверсии.

В доквантовой физике закон сохранения четности был известен, но его считали второстепенным. В квантовой механике роль этого закона стала ясна благодаря тем ограничениям, которые он наложил на поток событий, подчиняющийся вероятностным законам. После того как было установлено, что некоторые взаимодействия подчиняются ему, а некоторые нет, он стал важен вдвое. Однако истинная причина нарушения закона сохранения четности в слабых взаимодействиях пока еще не найдена.

Зарядовое сопряжение

Третьим членом триумвирата *CPT* является зарядовое сопряжение, т. е. замена частиц античастицами и наоборот. Как подчеркивалось в главе седьмой, связь операции замены частиц античастицами с обращением времени и пространственной инверсией обусловлена тем, что античастицы описываются как частицы, движущиеся в направлении, противоположном течению времени. Одновременно с ниспровержением сохранения четности произошло и более скромное ниспровержение инвариантности относительно зарядового сопряжения. В настоящее время положение дел таково: *T*-инвариантность представляется абсолютным законом. Абсолютный характер также носит инвариантность относительно комбинации пространственной инверсии (*P*) и зарядового сопряжения (*C*), а, стало быть, верна теорема *CPT*, которая гласит, что все три операции, выполненные одновременно, образуют абсолютный принцип инвариантности. В случае сильных и электромагнитных взаимодействий спра-

ведливы по отдельности инвариантность относительно пространственной инверсии (P) и зарядового сопряжения (C). Слабые взаимодействия нарушают обе эти инвариантности, однако они ограничиваются сохранением «комбинированной четности», т. е. инвариантны относительно операции CP [1]).

Левовинтовое нейтрино, нарушающее инвариантность относительно пространственных инверсий, нарушает также и инвариантность относительно зарядового сопряжения. Рассмотрим, например, распад положительного π-мезона:

$$\pi^+ \to \mu_L^+ + \nu_{\mu L}.$$

Индекс L указывает, что нейтрино и положительный μ-мезон разлетаются, образуя левовинтовые системы. Мы знаем, что зарядовое сопряжение (C) в этом случае приводит к замене частиц античастицами, тогда как операция четности (P) превращает левовинтовое движение в правовинтовое (индекс R). Итак, мы получаем следующие преобразованные процессы:

$$C:\ \pi^- \to \mu_L^- + \overline{\nu_{\mu L}} \quad \text{(запрещен)},$$

$$P:\ \pi^+ \to \mu_R^+ + \nu_{\mu R} \quad \text{(запрещен)},$$

$$CP:\ \pi^- \to \mu_R^- + \overline{\nu_{\mu R}} \quad \text{(разрешен)}.$$

Зарядовое сопряжение (C) приводит к «невозможному» процессу (т. е. к такому, который никогда не наблюдался), так как оно превращает левовинтовое нейтрино в левовинтовое антинейтрино, но антинейтрино правовинтовые. Поэтому такой распад, обусловленный слабым взаимодействием, нарушает инвариантность относительно зарядового сопряжения (C). Пространственная инверсия (P) превращает левовинтовое нейтрино в правовинтовое, т. е. приводит к процессу, который опять-таки никогда не наблюдался. Однако обе операции C и P в сумме превращают левовинтовое нейтрино в правовинтовое антинейтрино. Последняя строчка нашего списка символических распадов описывает то, что действительно происходит при распаде отрицательного π^--мезона. Применение

[1]) См. примечание на стр. 285. — *Прим. перев.*

операции CP (комбинированной четности) к физически разрешенному процессу дает также физически разрешенный процесс. Эти, а также ряд других примеров помогли установить, что даже недисциплинированные слабые взаимодействия не нарушают комбинированной инвариантности CP.

Чтобы завершить обсуждение, связанное с преобразованиями CPT, мы приведем еще два типа инверсий процесса распада положительного π-мезона:

$$T:\quad \nu_{\mu L} + \mu_L^+ \to \pi^+ \qquad \text{(разрешен)},$$

$$CPT:\quad \overline{\nu_{\mu R}} + \mu_R^- \to \pi^- \qquad \text{(разрешен)}.$$

Обращение времени изменяет порядок событий в исходном процессе. Все три преобразования, вместе взятые, меняют местами правое и левое, частицы и античастицы, прошлое и будущее. Каждый из этих процессов, полученных в результате преобразований, почти наверняка физически возможен, но нет никаких надежд проверить это на опыте.

Хотя левовинтовое нейтрино и нарушает сохранение четности и инвариантность относительно зарядового сопряжения, оно, вероятно, не может дать ответа на вопрос: *почему* эти нарушения происходят в слабых взаимодействиях? Существует ряд процессов, в которых не участвует нейтрино и в то же время нарушаются эти законы сохранения. Например, известно, что при распаде Λ^0-частицы

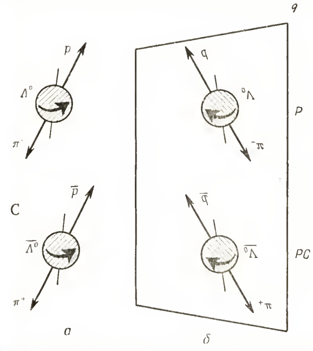
$$\Lambda^0 \to p + \pi^-$$

протон вылетает преимущественно в том направлении, куда смотрел «северный полюс» Λ-частицы, а π-мезон — в противоположном направлении, т. е. в сторону «южного полюса». Процесс распада изображен на верхней части фиг. 47, *а*. (Напомним, что если пальцы правой руки согнуты в направлении вращения, то отставленный большой палец укажет на север.) Такая асимметрия распада нарушает инвариантность относительно пространственной инверсии, так как при зеркальном отражении протон будет вылетать в направлении южного полюса, а не так, как происходило бы, если бы Λ^0-частицу просто перевернули вверх ногами.

На нижней части фиг. 47, *а* изображен гипотетический процесс, возникающий в результате зарядового сопряжения:

$$\overline{\Lambda^0} \to \bar{p} + \pi^+.$$

Хотя до сих пор не удалось обнаружить преимущественное направление вылета π-мезона при распаде



ФИГ. 47. *Распад ориентированной Λ-частицы на протон и отрицательный π-мезон.*

а — нормальный вид; *б* — отраженный в зеркале.

анти-Λ-частицы, другие менее прямые доказательства убеждают нас, что такого процесса *не* происходит.

Наконец, на нижней части фиг. 47, *б* изображено зеркальное отражение зарядово-сопряженного процесса, которое представляет собой результат применения операции *CP*. И снова мы получаем физически

разрешенный процесс, при котором антипротон вылетает в направлении южного полюса анти-Λ-частицы.

Никто не знает, почему слабые взаимодействия подчиняются лишь комбинированной инвариантности относительно зарядового сопряжения и пространственной инверсии (и так ли это вообще?). Но это обстоятельство заставляет физиков более серьезно подумать о характере зеркального изображения. По существу, *CP*-инвариантность поставила следующий вопрос: откуда нам *известно*, что зеркальным изображением частицы является частица, а не античастица? Быть может, по некоторым причинам превращение частиц в античастицы происходит одновременно с пространственной инверсией и «истинное» зеркальное изображение получается в результате комбинированной операции *CP*?

Тот же вопрос можно сформулировать в духе классической физики: откуда нам известно, что зеркальным изображением положительного заряда будет также положительный заряд? Мы можем узнать знак электрического заряда только по его воздействию на другие заряды. Заряд протона произвольно назван положительным. Любой другой заряд будет также положительным, если протон отталкивает его, и отрицательным, если протон его притягивает. Если понаблюдать в зеркало за протоном и электроном, то мы увидим, что они притягиваются друг к другу, однако никакие ухищрения не помогут избавиться от сомнений, не видим ли мы отрицательный протон и положительный электрон. Будет довольно странно, но тем не менее вполне логично, если мы предположим, что, помимо пространственной инверсии, зеркало производит зарядовое сопряжение. В этом случае то, что мы видим в зеркале, всегда будет представлять собой физически разрешенный процесс. Это звучит так, как если бы мы могли заставить зеркало заклинанием изменить то, что видно в нем. Конечно, то, что мы видим в зеркале, не может измениться. Отчасти дело в том, что нам не ясно, *что́* мы видим. То, что изображением протона является протон, — лишь наше предположение. Если мы предпочтем противоположное предположение (тщательную аргументацию которого никому не удастся опровергнуть) и будем считать, что

изображением протона является антипротон, то в этом случае *CP*-инвариантность покажется нам более «естественной». В следующий раз, когда вы взглянете в зеркало, подумайте о том, что, возможно. вы видите античеловека.

Изотопический спин

Каждое свойство природы находит свое отражение в законе сохранения. Справедливость этого заманчивого, но еще пока не получившего строгого доказательства утверждения, нашла новую поддержку благодаря обнаружению двух последних законов сохранения — странности и изотопического спина.

Ряд необычных свойств, таких, как «быстрое» рождение и медленный распад, существование одних процессов и отсутствие других, нашли простое объяснение в результате предположения, что сохраняется некое новое свойство вещества, названное странностью. Лежащий в его основе принцип инвариантности неизвестен. Мы знаем лишь, что если каждой частице, помимо ее спина, электрического, барионного, электронного и μ-мезонного заряда, приписать значение странности, то в этом случае закон сохранения странности в сильных взаимодействиях позволит объяснить обширный набор экспериментальных фактов, в частности отсутствие ряда процессов, которые в противном случае должны были бы наблюдаться.

Изотопический спин, носящий еще более своеобразное наименование, нежели странность, — это свойство того же типа. Он характеризует некую особенность, присущую сильно взаимодействующим частицам, суммарное «количество» которой остается неизменным на протяжении всех процессов, обусловленных сильным взаимодействием. К сожалению, изотопический спин не есть число, которое можно было бы приписать каждой частице. Он ведет себя подобно вектору, т. е. понятию, характеризуемому величиной и направлением. Дело осложняется еще и тем, что вектор изотопического спина существует не в обычном, а в совершенно ином пространстве, лежащем за пределами человеческих чувств, так называемом про-

странстве изотопического спина, или изотопическом пространстве.

Должно быть ясно, что даже самые смелые и наделенные самой богатой фантазией физики не осмелились бы всерьез предлагать подобные концепции, если бы их не вынуждали к этому накопленные экспериментальные данные. На каждом шагу по пути от обычных представлений окружающего нас макромира к совершенно иному и совершенно непривычному представлению о мире очень малого человек соглашался принять новые и странные концепции только в том случае, когда они приносили ему простейшее возможное объяснение некоторого круга экспериментальных данных. Иногда новые экспериментальные данные непосредственно порождали новые представления, как в случае фотоэлектрического эффекта, давшего жизнь фотону. Иногда развитие новых представлений происходит медленно на основе математики. Например, созданная Гейзенбергом квантовая механика завершила успешное математическое описание атомных явлений задолго до того, как во всем объеме стал ясен ее смысл. Новые представления о строении вещества, выдвинутые квантовой механикой, развивались на протяжении ряда лет, по мере того как возрастало количество математических следствий теории.

Чтобы показать, каким образом проникло в физику не поддающееся наглядному представлению воображаемое изотопическое пространство, мы должны вернуться к 1932 г., когда был открыт нейтрон. Известные до того времени частицы — электрон, фотон и протон — очень сильно отличались друг от друга. Новая же частица, нейтрон, совершенно очевидно, была сродни протону. Нейтрон и протон обладали почти одинаковыми массами, являлись составными частями ядер и притягивались друг к другу мощными силами нового типа. Под впечатлением этого сходства Вернер Гейзенберг в том же году показал, что протон и нейтрон можно было бы рассматривать как два различных состояния *одной и той же* частицы, нуклона. Если ограничиться только словами, то выполненный им математический трюк вряд ли оправдает себя. Потребовалось изобрести новое изотопическое пространство, в котором нуклону сопоставлялся вектор, который

мог быть ориентирован «вверх» (ничего общего не имеющий с «верхом» обычного пространства) или «вниз». Если вектор направлен вверх, то мы имеем дело с протоном, если вниз — то с нейтроном. Если одновременно имеются два или несколько нуклонов, как, скажем, в ядре, то их изотопические векторы будут складываться, образуя полный изотопический вектор, который может быть направлен вверх, вниз или в любом возможном направлении.

По мысли Гейзенберга, нуклон представляет собой «дублет», т. е. может существовать в двух возможных состояниях, в виде нейтрона или в виде протона. Но в природе уже не впервые отмечено существование дублетных свойств. Частица, обладающая спином $^1/_2$, такая, как протон или электрон, может находиться в состояниях, когда ее спин направлен либо вверх, либо вниз (в *обычном* пространстве). Это происходит вследствие требования квантовой теории, чтобы допустимые значения моментов количества движения (или спинов) различались на единицу. Если спин электрона, равный $^1/_2$, направлен вверх, то единственный способ изменить его на единицу состоит в том, чтобы перевернуть его вниз, т. е. перейти от $+^1/_2$ к $-^1/_2$. С другой стороны, если спин частицы равен 1, то он может быть ориентирован в трех различных направлениях—вверх, вниз и посредине, т. е. $+1$, -1 и 0. Идея Гейзенберга описывать протон и нейтрон как два состояния одной и той же частицы с точки зрения математики была эквивалентна описанию спина. Поэтому новое свойство нуклона, связанное с его ориентацией в гипотетическом пространстве, было названо спином нового типа. В действительности название неудачное, ибо это свойство не имеет никакого отношения к обычному спину. Поскольку превращение нейтрона в протон превращает одно ядро в другое и отдельные ядра иногда называют изотопами[1]), то новый тип «спина» был назван изотопическим спином. Вращение полного

[1]) Ядра с одинаковым числом протонов относятся к одному *элементу*. Каждый *изотоп* данного элемента содержит различное число нейтронов. Так, все ядра кобальта содержат 27 протонов. Кобальт-60 представляет собой изотоп кобальта, содержащий 27 протонов и 33 нейтрона.

вектора изотопического спина группы нуклонов в изотопическом пространстве соответствует переходу от одного ядра к другому с тем же числом нуклонов.

Прошло несколько лет, прежде чем стало ясно, является ли изотопическое пространство Гейзенберга просто математическим построением или чем-то имеющим реальное физическое содержание. Два обстоятельства решили эту дилемму в пользу реального значения изотопического спина. Прежде всего по мере обнаружения новых частиц было установлено, что эти частицы, подобно протону и нейтрону, входят в состав ряда групп. Существуют три π-мезона, которые образуют триплет и могут быть описаны как три состояния одной частицы с единичным изотопическим спином; Σ-частица также образует триплет, а K-мезоны, подобно нуклонам, — дублет. Поэтому K-мезонам был приписан изотопический спин $^1/_2$. А Λ-частица оказалась одинокой, она составляет синглет; ее изотопический спин равен нулю.

Вторым и более важным обстоятельством оказался закон сохранения изотопического спина, которому подчиняются сильные взаимодействия. Это означает, что вероятность любого процесса или сила любого взаимодействия остаются неизменными при вращении вектора полного изотопического спина в изотопическом пространстве. Одно из следствий этого закона, например, состоит в том, что взаимодействие между протоном и положительным π-мезоном должно быть в точности таким же, как и между нейтроном и отрицательным π-мезоном, ибо переход от $(p+\pi^+)$ к $(n+\pi^-)$ эквивалентен переворачиванию изотопических спинов нуклона и π-мезона «сверху» «вниз».

Имеется множество следствий закона сохранения изотопического спина, однако большинство из них с трудом поддается наглядному изображению. Однако, грубо говоря, значение закона состоит просто в утверждении зарядовой независимости. Когда дело доходит до сильных взаимодействий, то природе становится безразлично, какой электрический заряд несет частица. Протон и нейтрон оказываются на равных основаниях, положительный, отрицательный и нейтраль-

ный π-мезон — все взаимодействуют одинаково. Все происходит так, как если бы различные заряды соответствовали разному цвету, а сильные взаимодействия могли отличать только черное от белого.

С другой стороны, фотон чрезвычайно четко различает цвета. Он взаимодействует с заряженными частицами и игнорирует нейтральные. Поэтому электромагнитные взаимодействия нарушают закон сохранения изотопического спина. Насколько нам сейчас известно, что *единственный* закон сохранения, не являющийся общим для сильных и электромагнитных взаимодействий. Причина этого? Ее никто не знает.

Не следует удивляться тому, что слабые взаимодействия нарушают также закон сохранения изотопического спина. Например, при распаде Λ-частицы

$$\Lambda^0 \to p + \pi^- \quad \text{или} \quad \Lambda^0 \to n + \pi^0$$

изотопический спин вначале равен нулю. Однако в конце нуклон имеет изотопический спин $1/2$, а π-мезон — изотопический спин 1. Эти значения комбинируются таким образом, что полный изотопический спин равен либо $1/2$, либо $3/2$, т. е. в любом случае отличен от нуля. Существующие данные показывают, что Λ-частица предпочитает наименее явное нарушение, и в конечном состоянии изотопический спин оказывается равным $1/2$.

Сильные взаимодействия ограничиваются 12 законами сохранения:

энергии,
импульса,
момента количества движения,
электрического заряда,
электронного (лептонного) заряда,
μ-мезонного (лептонного) заряда,
барионного заряда,
временно́й четности (T),
комбинированной четности (CP),
пространственной (P) и зарядовой четности (C) по отдельности,
странности,
изотопического спина.

К сожалению, эти законы еще не позволяют достичь заветной цели — однозначно определить свойства сильных взаимодействий только из законов сохранения. Однако они налагают чрезвычайно сильные запреты на то, что может происходить в природе. Мы будем недалеки от истины, если скажем, что, насколько нам известно, в основе устройства всего мира лежит тот факт, что во всех процессах изменения, во всей царящей в мире суете, некоторые из этих величин, а может быть, и все они остаются неизменными.

Спускаясь по лестнице взаимодействий, мы обнаруживаем, что теряем закон сохранения изотопического спина уже на первой ступени вниз, где обосновались электромагнитные взаимодействия. Спустившись к слабым взаимодействиям, мы теряем законы сохранения странности, четности, зарядовой четности. Последний шаг вниз к гравитационным взаимодействиям на субмикроскопическом уровне еще не сделан. Приведет ли он к падению еще большего числа законов сохранения — пока остается заманчивой проблемой на будущее.

Элементарные частицы явились естественным пробным камнем для двух крупнейших теорий нашего столетия, теории относительности и квантовой механики, для фундаментальных представлений о полях как изначального материала Вселенной и для гипотезы, согласно которой принципы симметрии и законы сохранения представляют собой квинтэссенцию законов природы, из которых вытекает все остальное.

В XVII веке человек заглянул во Вселенную и был потрясен, обнаружив, что его Земля — это крохотный островок вещества, затерявшийся на окраине космоса. В нашем веке мы проникли в глубь вещества и нашли новый повод для смирения. Там, где мы рассчитывали обнаружить прочные кирпичи вещества, служащие материалом, из которого построен человек и окружающий его мир, происходило лишь беспорядочное возникновение и уничтожение мириадов недолговечных частиц вещества и призрачной субстанции волновых полей. Там, где мы надеялись встретить законы, дающие однозначные предсказания, господствовали законы вероятности, и на каждом шагу мы сталкивались с игрой случая: случай сделал некото-

рые частицы стабильными, по воле случая нейтрон оказался в состоянии жить вечно внутри ядра, случай избавил нас от угрозы аннигиляции с античастицами. И над этим хаосом и неопределенностью господствуют законы сохранения, которые ограничивают определенными рамками безудержную энергию Вселенной и делают возможным существование непостижимо сложного и сказочно стройного мира вокруг нас.

Чтобы успешно развивать науку, нужно уметь правильно ставить вопросы. Для современной эпохи в физике характерна особая требовательность, и ее плодородие скорей всего объясняется тем, что у нас имеется множество вопросов, по крайней мере часть из которых безусловно окажется важной. Почему масса встречается только в порциях определенной величины? Почему сохраняется число барионов? Реальны ли поля? Что представляет собой пространство и время — действующие лица или только подмостки сцены? И множество других вопросов, ставившихся на страницах этой книги. Вера в простоту, служившая на протяжении всей истории наиболее действенным стимулом научных исследований, и по сей день остается основным поводом для поиска ответа на эти вопросы. Большинство ученых разделяют твердую веру в то, что есть простые ответы на эти вопросы и существуют еще более глубокие и фундаментальные недра вещества, энергии, пространства и времени, пока еще нам неизвестные.

ПОСЛЕСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Для многих, кто даст себе труд прочитать эту книгу, приятным сюрпризом окажется мастерство, с каким ее автору удалось на страницах научно-популярной книги воссоздать атмосферу беспокойного ожидания, царящую в наши дни на передовых рубежах физической науки. Как и в те времена, когда утверждалась квантовая механика, в наши дни часто можно слышать сетования на математическую абстрактность, отсутствие наглядности и вообще «непонятность» современной физики. Действительно, даже работающие над одними и теми же проблемами физики элементарных частиц теоретики и экспериментаторы подчас плохо знакомы с ремеслом друг друга. Современная физика, несомненно, сложна. Однако основные идеи, питающие современные представления, просты, и книга Форда прекрасно иллюстрирует это обстоятельство. Она знакомит читателя не только с положением дел, но и с многими очень тонкими, интимными сторонами физики элементарных частиц. Связь принципов симметрии с законами сохранения, волновые поля и природа частиц, фейнмановские диаграммы — все эти вопросы на первый взгляд совершенно не укладываются в рамки популярной книги. К этому следует добавить, что большинство представлений, характерных для этого раздела физики, необычно с точки зрения старых, классических представлений и здравого смысла повседневной жизни. Люди редко задумываются над тем, что́ действительно

можно считать твердо установленным. Однако многое из того, что казалось неизменным еще вчера, назавтра теряет смысл. Книга увлекательно и глубоко обрисовывает различные стороны этого процесса. Конечно, иногда читатель может и не согласиться с автором, когда тот переходит от описания фактов к их толкованию. Но уже сам факт, что книга заставит читателя поразмыслить над природой вещей, безусловно, оправдывает ее появление. Идеи современной физики вряд ли оставят кого-либо равнодушным.

Книга написана автором с глубокой верой в могущество принципов симметрии. И бурное развитие физики за последние 2—3 года, безусловно, оправдало надежды автора. Подобно периоду «золотой» лихорадки, в среде физиков-теоретиков в настоящее время наблюдается нечто вроде «симметрийной лихорадки». Это можно понять. Дело в том, что число частиц, которые все еще продолжают называть элементарными, сегодня составляет около 200. Царившие среди всех этих частиц хаос и беспорядок, отсутствие общих принципов, которые могли бы быть положены в основу их классификации, лишали физиков душевного равновесия. Но вот появились первые признаки порядка: частицы удалось сгруппировать в крупные семейства (супермультиплеты) по 8—10 частиц в семействе. Стало ясно, что разница между «частицами» и резонансами несущественна. Просто, если угодно, первым не повезло. Они оказались слишком легкими, чтобы испытывать сильный распад (например, $\Sigma^+ \to \Lambda^0 + \pi^+$), и их длительному существованию должно положить конец слабое взаимодействие. Окажись резонансы чуть легче, и у них не оставалось бы других способов распада, кроме медленных — слабых. Сейчас удалось «сформировать» три восьмиричных семейства (октета). Это барионы со спином $^1/_2$: два нуклона, одна Λ-, три Σ- и две Ξ-частицы. Затем мезоны со спином 0: три π-, четыре K- и один η^0-мезоны. И, наконец, мезоны со спином 1: три ρ-, четыре K^*- и один φ-мезон. Но, пожалуй, особый энтузиазм вызвало построение десятки (декуплета) барионов со спином $^3/_2$, включающей четыре Δ^*, три Σ^*-, две Ξ^*- и Ω^--частицу, которая из-за большого значения странности (—3) оказалась избавленной от сильных рас-

падов, т. е. истинно долгоживущей частицей. Энтузиазм этот, в частности, был обусловлен тем, что Ω^--частица сначала была «открыта на бумаге», а вскоре, и по указанному теоретиками «точному адресу» ее обнаружили экспериментально. Потом подтвердились и другие предсказания. Это показало, что в принципах систематики есть определенное «рациональное зерно».

Следует сказать, что физики, наученные горьким опытом провала наглядных представлений, до последнего времени не очень пытаются предвосхитить события и решить вопрос о смысле самого понятия «элементарная частица». Но, может быть, уже пришлс время спросить: почему все-таки частиц так много? «Здравый смысл», столь часто подводивший физиков в прошлом, подсказывает ответ: потому что они не элементарные, а составные, т. е. построены из более простого строительного материала. Идея о том, что «элементарные» частицы — составные, не нова. По-видимому, впервые она была выдвинута около 20 лет назад Ферми и Янгом, которые предположили, что π-мезоны построены из пар нуклон — антинуклон, например, π^+-мезон состоит из протона и антинейтрона. В дальнейшем набор кирпичей расширился и к ним присоединили странную Λ-частицу. Совсем недавно появилась грубая, но довольно соблазнительная по своим результатам модель, согласно которой все сильно взаимодействующие элементарные частицы построены из более «мелких» частиц всего трех сортов, которые обладают дробным электрическим зарядом: $+^2/_3$, $-^1/_3$ и $-^1/_3$ (в единицах заряда электрона). Один из создателей этой модели М. Гелл-Манн окрестил новорожденные кирпичи мироздания «кварками». Название это он заимствовал у мифических персонажей (бесов, домовых), населяющих один из романов Дж. Джойса. Таким образом, в продолжение сложившейся в физике элементарных частиц и уже знакомой читателю традиции называть вещи своими именами (слабые взаимодействия, странные частицы) здесь, по-видимому, впервые появились представители «нечистой силы». Гипотеза о кварках весьма привлекательна и нравится многим физикам, но, разумеется, имеется и немало скептиков, которые тре-

буют прямого доказательства их существования, тем более что модель кварков основана на крайне примитивных представлениях и, по существу, игнорирует современный взгляд на строение вещества, о котором так много говорилось в этой книге. Пока кварки в опытах не обнаружены, несмотря на то что среди экспериментаторов тоже немало «охотников», горящих желанием «ловить» кварки где угодно — в лабораториях, в космосе, в пучине океана. В частности, исследования, выполненные на крупнейших ускорителях, показали, что в области масс до 4 *Гэв* кварков нет. Возможно, они окажутся еще тяжелее (подробнее читатель сможет познакомиться с этими вопросами по статье Я. Б. Зельдовича в июньском номере журнала «Успехи физических наук» за 1965 г.).

Но, пожалуй, одним из самых серьезных предостережений легковерным явилось обнаруженное в распадах долгоживущего K^0-мезона несохранение комбинированной четности. Незадолго до этого инвариантность относительно обращения времени, казалось, была подтверждена в исследованиях β-распада. Возможно, что β-распад снова подвел физиков. Ведь, будучи знакомы с ним на протяжении почти полувека, физики и не подозревали, что в нем не сохраняется четность. Природа ревниво оберегала свою тайну. Комбинированная четность продержалась всего около 5 лет. Однако все, что мы пока знаем, это лишь указание, что такая возможность существует. Опыты проверяются, их толкование уточняется. Во всяком случае, сегодня есть серьезное сомнение в *CP*-инвариантности. Что будет дальше — сказать пока нельзя.

В заключение отметим еще раз, что книга Кеннета Форда не просто знакомит читателя с обширным кругом интересных фактов и явлений, а дает возможность по-новому взглянуть на устройство микромира и его законы.

Е. Лейкин

ОГЛАВЛЕНИЕ

Кеннет Форд

МИР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Редактор *Л. В. ГЕССЕН.*
Художник *А. П. Радищев.* Художественный редактор *Е. И. Подмарькова.*
Технический редактор *А. Г. Резоухова.*

Сдано в набор 10/VI 1965 г. Подписано к печати 16/XI 1965 г.
Бумага $84 \times 108^1/_{32}$=4,91 бум. л., 16,48 печ. л. в т/ч вкл. 1. Уч.-изд. л. 15,01.
Изд. № 2/2940. Цена 80 к. Зак. 1591. Темплан 1965 г. изд-ва «Мир». Пор. № 67.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой
Главполиграфпрома Государственного комитета Совета
Министров СССР по печати. Измайловский проспект, 29.

